



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**ANSSI AHO**  
**SELLUTEHTAAN HYDRAULIKÄYTTÖISTEN KONEIDEN**  
**KUNNONVALVONTAMITTAUSTEN KEHITTÄMINEN**  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Tek-  
nisten tieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 8. huhtikuuta  
2015

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

AHO, Anssi: Sellutehtaan hydraulikäyttöisten koneiden

kunnonvalvontamittausten kehittäminen

Diplomityö, 46 sivua, 60 liitesivua

Marraskuu 2015

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen

Avainsanat: kunnonvalvonta, öljyanalyysi, partikkelianalyysi, viskositeetin mittaaminen, öljyn vesipitoisuus, Python, open source

Kunnonvalvontamittaukset liittyvät standardin SFS-EN 13306 mukaan tiiviisti kuntoon perustuvaan kunnossapitoon. Laitteiden kuntoa seurataan ja huoltosuunnitelma laaditaan mittaustulosten mukaan. Monimutkaisessa laitoksessa kuten sellutehtaassa suunnitellun mukainen huolto voi olla päämäärä, mutta todellisuudessa kaikkeen ei voida varautua etukäteen, jolloin osa kunnossapidosta on aina korjaavaa. Kunnossapitomittausten tulisi siis pystyä tuottamaan tietoa myös korjaavan kunnossapidon avuksi esimerkiksi vianetsintää varten. Toisaalta korjaustoimenpiteiden tulisi aina johtaa myös parannustoimenpiteisiin, jotta korjattu kohde voidaan tulevaisuudessa ennakkohuoltaa. Tällöin kunnonvalvontamittausten tulisi tuottaa tietoa myös vian syyn ja sen poistamisen avuksi.

Työssä käsiteltiin käytännön mittausten menetelmiä hydraulisilla- ja voitelujärjestelmien kunnon tarkkailuun, niiden luotettavuutta ja mahdollisuuksia integroida mittauksia osaksi prosessia. Mitattaviksi suureiksi valittiin: Öljyn partikkelimäärä, vesipitoisuus ja viskositeetti. Lisäksi tutkittiin järjestelmien painemittauksista sekä venttiilitestauksesta saatavia tuloksia. Ollakseen toteutuskelpoisia, mittausten menetelmien on tuotettava yksiselitteistä tietoa prosessin kunnosta riittävällä tarkkuudella ja oltava samalla kustannustehokkaita. Mittausten menetelmien kehittämisessä käytettiin hyväksi mahdollisimman paljon vapaata lähdekoodia ja rapid prototypingin ajattelumallia, jotta aika suunnitelmasta mittaukseksi olisi mahdollisimman lyhyt. Pyrittiin myös hyväksikäyttämään mahdollisimman paljon jo olemassa olevia mittavälineitä.

Partikkelilaskennan mittaustulokset todettiin otannassa riittävän luotettaviksi, jotta tulosten perusteella uskalletaan suositella kunnossapitotoimenpiteitä. Myös painemittausten hyödyllisyys todettiin käytännössä. Sovellettu vesipitoisuusmittaus ei täytä luotettavuuskriteereitä, eikä mittausta näin ollen voi suositella otettavaksi käyttöön. Vesipitoisuuden kontrollointi on kuitenkin mittausten perusteella tarpeen. Viskositeetti mitattiin laitteistolla, jonka todettiin olevan epäkunnossa. Noudattamalla tiettyjä reunaehtoja viskositeettimittauksista saatiin kuitenkin toistettavia, mittaaminen on tarpeellinen epätavallisissa lämpötilaoloissa toimiville järjestelmille. Venttiilitestauksen osalta mittaaminen on ainoastaan apuväline järjestelmän analyysissä, johon tarvitaan erityistä osaamista käyttäjältä, tämä periaate pätee tietysti enemmän tai vähemmän kaikkiin mittauksiin.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**AHO, Anssi** Development of condition monitoring measurements of hydraulic machinery in pulp mill

Master of Science Thesis, 46 pages, 60 Appendix pages

November 2015

Major: Fluid Power

Examiner: Professor Jari Rinkinen

Keywords: condition monitoring, oil analysis, particle analysis, viscosity measurements, oil water content, Python, open source

According to Standard SFS-EN 13306, condition monitoring measurements relate firmly condition-based maintenance. Equipment condition will be monitored and maintenance plan is drawn up according to the measurement results. In a complex institution such as pulp mill, maintenance in accordance with the plan may be the goal, but in reality everything can not be prepared in advance, so that part of the maintenance is always corrective. Maintenance measurements should therefore be able to provide information to assist in corrective maintenance, for example troubleshooting. On the other hand remedies should always lead to the improvement measures in order to in the future to service the repaired item in advance. In this case, the condition monitoring measurements should provide information on the cause of the fault and help its removal. The thesis discusses the practical measurement methods for hydraulic and lubrication systems, condition monitoring, their reliability and the opportunities to integrate measurements into the process. Following measurement quantities were chosen: Particle analysis of lubricants, water content and viscosity. Also pressure measurement systems as well as valve testing were examined. In order to be feasible, the measurement methods must produce unambiguous information on the condition of the process with sufficient accuracy, and at the same time be cost-effective. The development of measurement methods utilized as much as possible the free source code and Rapid Prototyping thinking pattern to make time to plan a measurement as short as possible. Also it was sought to exploit as much as possible the existing measuring instruments at site.

Particle counting measurements were found in the samples sufficiently reliable so that according to measurement results maintenance measures can be recommended. Pressure measurements were tested in practice and found useful. Measuring the water content the way described in thesis does not meet the reliability criteria, and the measurement thus can be recommended for use. However, control of water content is generally necessary. Viscosity was measured by device which was found to be out of order. By following certain boundary conditions for viscosity measurements were obtained. Viscosity measurement is necessary for systems operating in extreme temperature conditions. Valve testing in respect of the measurement is the only tool for system analysis, which requires special skills from the user, this principle also applies, of course, more or less to all measurements.

## ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty UPM Pietarsaaren sellutehtaalla tähdäten hydrauliiikan ja voitelun toimintavarmuuden parantamiseen. Työssä on käytetty hyväksi paljon vapaata lähdekoodia eri lähteistä ja toivottavasti myös työssä julkaistu koodi tuottaa myös jollekin muulle vastaavaa riemua. Vapaan lähdekoodin eteen tehty työ kumuloituu ajan myötä ja on jatkuvasti helpompaa rakentaa nopeasti monimutkaisiakin järjestelmiä yhteisön tuottamista rakennuspalikoista.

Haluaisin kiittää Pietarsaaren tehtaan henkilöstöä avusta ja avomielisyydestä kehitystyötä kohtaan. Kiitokset Yngve Sandströmille ja Niklas Nymanille työn ohjaamisesta ja Kim Forssille yhteistyöstä voiteluhuollon kehittämisessä. Erityiskiitos käyttöinsinööri Kalle Ukonaholle erityispanoksesta työn valmistumiseksi.

"In God we trust; all others must bring data."

*W. E. Deming*



# SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Kunnonvalvonnan tavoitteet.....	2
2.1	Korjaava kunnossapito.....	3
2.2	Jaksotettu kunnossapito.....	3
2.3	Parantava kunnossapito.....	4
3	Öljyn kunnonvalvonta.....	5
3.1	Partikkelilaskentamenetelmät.....	5
3.1.1	Paine-eroon perustuva partikkelilaskentamenetelmä.....	6
3.1.2	Partikkelien kokojakauma.....	6
3.1.3	Mikroskooppilaskenta.....	7
3.2	Partikkelianalyysi open-source mikroskoopilla.....	7
3.2.1	Mikroskoopin rakenne.....	7
3.2.2	Mikroskoopin ohjaus.....	9
3.2.3	Näytteen preparointi.....	13
3.2.4	Kuvankäsittely ja partikkelilaskenta.....	14
3.2.5	Laskennan tilastollinen tarkastelu ja virhearvio.....	15
3.2.6	Partikkelilaskennan tulosten tarkastelu.....	18
3.3	Vesipitoisuuden mittaus.....	24
3.3.1	Veden poistaminen öljystä.....	25
3.3.2	CASE kiertovoitelujärjestelmä.....	28
3.4	Öljyn kunnonvalvonta anturi – Hydac HLB1400.....	30
3.5	Öljyn viskositeetti.....	32
3.5.1	Viskositeetin mittaus Brookefield-viskometrillä.....	34
4	Hydrauliikkaventtiilien testaus.....	38
5	Painemittaukset.....	39
5.1	Turbiinigeneraattorin pikasulkulohkon mittaukset.....	39
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	44
	Lähteet.....	45
	Liite A Ohjeet mikroskooppinäytteen analysointiin.....	47
	Liite B Partikkelilaskentamenetelmän dokumentaatio.....	57
	Liite C Puhtaustuloksia.....	70
	Liite D HLB 1400 Tuloksia.....	78
	Liite E Viskositeettimittausten tuloksia.....	85
	Liite F Testausohje proportionaaliventtileille.....	101
	Liite G Venttiilin testaustuloksia.....	102
	Liite H Venttiilitestauselektroniikan dokumentaatio.....	104

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>Adhesiivinen kuluminen</b>	Pintojen välisen paineen aiheuttaman kylmähitsautumisen murtumisesta johtuva kuluminen
<b>Bitti</b>	Binäärijärjestelmän yksikkö.
<b>CMOS</b>	Digitaalikameroissa käytetty sensori valovoiman mittaamiseen
<b>Dielektrisyysvakio</b>	Kuvaa materiaalin sähkökentän heikennysvaikutusta
<b>Excel</b>	Taulukkolaskentaohjelma
<b>Elastohydrodynaaminen voitelu</b>	Voitelutapaus, jossa voitelukalvo erottaa toisiaan vastaan liikkuvat pinnat
<b>Membrani</b>	Hienojakoinen selluloosanitraattikalvo, joka läpäisee nestettä mutta ei kiintoainetta tiettyyn partikkelikokoon saakka
<b>Open source</b>	Vapaasti jaettavaksi ja kopioitavaksi tarkoitettu ohjelma tai muu normaalisti tekijänoikeuksien suojaama hyödyke
<b>Proportionaaliventtiili</b>	Hydrauliventtiili, jonka läpäisemä tilavuusvirta on suhteessa kelavirtaan
<b>Python</b>	Tulkattava ohjelmointikieli.
<b>PWM</b>	Pulssinleveysmodulaatio
<b>Resoluutio (mittaus)</b>	Mittauksen näytteenottotaajuus [1/s]
<b>Resoluutio (kuva)</b>	Kuvan pikseleiden määrä, ilmoitetaan usein korkeus ja leveyssuunnalle erikseen

$A$	Membranin pinta-ala	[mm <sup>2</sup> ]
$A_1$	Kuvan pinta-ala	[mm <sup>2</sup> ]
$C$	Spindelivakio	
$c_p$	Ominasilämpökapasiteetti	[kJ/kg K]
$dE$	Lämpömäärän muutos	[kJ]
$E_h$	Faasimuutos lämpö	[kJ]
$F$	Voima	[N]
$f$	Laskenta alueiden määrä	[kpl]
$M$	Suhteellinen momentti	[%]
$m$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Massavirta	[kg/s]
$N$	Partikkelimäärä per ml	[kpl/ml]
$n$	laskettujen partikkelien määrä	[kpl]
$P$	Teho	[kW]
$Q$	Tilavuusvirta	[l/min]
$T$	Lämpötila	[°C]
$V$	Tilavuus	[ml]
$\nu$	Viskositeetti	[mPa*s]
	Paine	[bar]
	Vesipitoisuus	[ppm]
	Sähkövirta	[mA]
	Jännite	[V]
	Kinemaattinen viskositeetti	[cSt]
	Sähkönjohtavuus	[μS/m]
$\dot{\gamma}$	Leikkausnopeus	[1/s]
$\Delta H$	Spesifi latentti lämpö	[kJ/kg]
$\Delta T$	Lämpötilan muutos	[°C]
$\eta$	Dynaaminen viskositeetti	[mPa*s]
$\mu$	Keskiarvo	
$\rho$	Tiheys	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Keskihajonta	
$\tau$	Leikkausvoima	[N/m <sup>2</sup> ]
$\partial$	Osittaisderivaatta	
$\nabla$	Gradientti	

# 1 JOHDANTO

Sellun valmistaminen on monimutkainen ja pääomaintensiivinen prosessi, jossa on pystyttävä hallitsemaan suuria massa- ja energiavirtoja. Hydraulinen tehonsiirto sopii hyvin sovelluksiin, joissa tarvitaan lineaariliikettä, hyvää teho-paino -suhdetta tai hyvää säädettävyyttä. Suorien hydraulikäyttöjen lisäksi hydraulikkaa tarvitaan myös kierto-voitelujärjestelmissä ja muussa voitelussa.

Prosessiteollisuudessa tavoitellaan jatkuvaa käyntiä, jolloin kunnossapitotoimenpiteiden ajoittaminen suunnitelman mukaisiin huoltoseisakkeihin on tärkeää. Kuluville komponenteille, kuten soodakattilan sularänneille tai arkkileikkurin terille on kokemuksen perusteella määriteltävissä käyttöikä, jonka mukaan huoltotoimenpiteet voidaan suunnitella. Olettamuksena on, että komponenttia kuluttavat voimat pysyvät ajan suhteen jotta-kuinkin vakioina ja prosessin ulkopuolisten muuttujien vaikutus kulumiseen on vähäinen.

Hydraulijärjestelmien vikaantuminen johtuu yleensä ulkoisista tekijöistä, minkä takia hydraulikka vikaantuu ajan suhteen hyvin epälineaarisesti, jolloin ennakkohuollon suunnittelussa ei voida käyttää samoja lähtökohtia, kuin kuluvien komponenttien huollon suunnittelussa. Hydraulioöljyn joukkoon kulkeutuneiden vieraiden materiaalien määrä on paras mittari hydraulikan vikaantumisen ennustamisessa.

Tässä työssä pyrittiin kehittämään suoria mittausmenetelmiä, joilla voidaan diskreetisti mitata ulkoisten muuttujien vaikutus hydraulijärjestelmään, korjaamaan järjestelmän tila normaaliksi ja mahdollisesti löytämään ongelman aiheuttava ilmiö. Mittaaminen voidaan periaatteessa toteuttaa osana prosessinhallintaa, mutta ongelmien syyn selvittämiseksi tarvitaan tilannekohtaista analyysiä ja korjaustoimenpiteitä. Menestyksellisen analyysin suorittamiseksi tulisi kerätä enemmän tietoa järjestelmän tilasta ajan suhteen, kuin normaalin kunnonvalvonnan suorittamiseksi olisi tarpeellista.

## 2 KUNNONVALVONNAN TAVOITTEET

Oletetaan, että kunnossapidon optimitilanne on sellainen, jossa jokaiselle komponentille voidaan määritellä kestoikä vaadittavaan keskeytymättömään käyntiaikaan suhteessa olevalla tarkkuudella. W.E. Demingin mukaan jatkuvasta laadun mittaamisesta on luovuttava [1, s. 26] ja rakennettava laatu tuotteeseen. Teoreettisessa optimitilanteessa komponenttien kunnan mittaaminen olisi tarpeetonta, koska kaikki ulkoisten tekijöiden vaikutukset komponenttien kuntoon olisi suljettu pois ja normaalin kulumisen vaikutukset tunnettaisiin tarkasti.

Valmistavassa teollisuudessa tuotteen laadun määritelmä on P.B. Crosbyn mukaan [2, s. 36] tuotteen vaatimustenmukaisuus. Määritellään kunnossapidon vaatimuksiksi:

1. Kaikkien kunnossapidon piirissä olevien laitteiden jatkuva saatavilla olo tuotantoprosessin käyttöön
2. Kunnossapitotöiden ajoittaminen suunniteltuihin seisakkeihin.

Crosbyn mukaan "laadun mittaaminen on hinta vaatimusten täyttymättömyydestä". Hydraulijärjestelmän kunnossapidon tapauksessa voidaan määritellä kunnanvalvontamittausten olevan hinta komponenttien kestojen ja hydrauliiikkaöljyn kunnan ennakoitavuudettomuudesta.

Kunnanvalvontamittausten laatua voidaan tarkastella esittämällä kysymys: "Mitä toimenpiteitä mittauksen tulosten perusteella olisi tehtävä?". Jos vastaus kysymykseen on lähes poikkeuksetta "ei mitään" tai "seurataan tilannetta", voidaan päätellä että joko on saavutettu tilanne, jossa ennakkohuoltosuunnitelma toimii optimaalisella tavalla ja kunnanvalvontamittausten rooli on toimia pelkkänä kontrollina ja varmistuksena järjestelmän toimivuudesta, tai mittausten laatu ei herätä mittaajassa tai tulkitsijassa riittävää luottamusta kalliiden kunnossapitopäätösten tekemiseksi.

Ollakseen luottamusta herättäviä, mittausten tulisi olla riittävän tarkkoja, jotta ehjän ja rikkiäisen kohteen ero olisi yksiselitteinen ja konkreettinen. Mittaustuloksen ei tulisi olla pelkkä luku, vaan hypoteesi ilmiön esiintymisen testaamiseksi. Esimerkiksi: "Jos hydraulijärjestelmän paluulinjasta otettu näytteen ISO4406 luokka on suurempi kuin 18/16/14, on männänvarsi vaurioitunut ja sylinteri on vaihdettava seuraavassa huoltoseisakissa".

Kun tunnetaan myös minkälaisia tuloksia optimaalisesti toimivalta järjestelmältä tulisi odottaa, esimerkiksi: "Järjestelmän puhtaustavoite on ISO4406 luokka 14/12/10".

Näin asetettujen määritelmien välillä mittaustulosten tulisi edetä ajan suhteen jatkuvasti ”ehjästä rikkinäiseen”, eli mittaustuloksen tulisi riippuen menetelmästä, aina muuttua samaan suuntaan, ellei mitattavan kohteen kunto jostain mystisestä syystä parane itsestään. Käytännössä ”rikkinäisestä ehjään” -suuntaan osoittavia mittaustuloksia saadaan jatkuvasti mittausten hajonnan ja mittaussysteemin tahattomien muutosten vuoksi. Sekaannuksen välttämiseksi mittausten keskihajonta tulisi olla tunnettu ja mittausmenetelmä dokumentoitu.

Kun epävarmoja mittausmenetelmiä käytetään todentamaan muita mittauksia, hajonnan vaikutuksesta luottamus kaikkien mittausten tuloksiin heikkenee. Esimerkiksi: ”Vaihdelaatikosta otetun öljynäytteen suhteellinen kosteus oli 39 %. Membranikalvon läpi suodatettu näyte jätti kalvolle ruskean värin.” Ensimmäinen mittaus on ristiriidassa aistinvaraisesti tehtyjen havaintojen kanssa ja pahimmassa tapauksessa mittaaja jättää omat havaintonsa huomiotta ja luottaa anturista saataviin tietoihin. Mikäli jollakin mittauksella saadaan systemaattisesti vääriä positiivisia tuloksia ilman pätevää selitystä, mittaus ei edistä kunnossapitoa, vaan hankaloittaa sitä.

## 2.1 Korjaava kunnossapito

Yksinkertaisin ja suoraviivaisin kunnossapitostrategia voidaan kuvailla: ”Jokin on rikki – korjaa se”. Suunnittelun ja organisoinnin puutteessa käytännön kunnossapitotyö kulkee luonnollisesti kohti korjaavaa kunnossapitoa. Yksinkertaisin menetelmä on yleensä paras, mutta erityisesti prosessiteollisuudessa suurin osa laitteen rikkoontumisesta aiheutuvista kuluista johtuu tuotannonmenetyksistä korjauksen aikana [11, s. 19]. Käytännössä vika-korjausprosessi ei ole suinkaan yksinkertainen. Häiriön havaitsemisen jälkeen on etsittävä häiriön taustalla oleva vika. Vianetsintä on usein prosessin vaikein vaihe, joka vaatii aikaa ja asiantuntemusta kohteena olevasta laitteesta. Vian löydyttyä on tehtävä analyysi, kuinka vika voidaan korjata. Yleensä korjaus tarkoittaa jonkin komponentin vaihtamista, jolloin tarvitaan varaosia. Varaosavaraston pitäminen on taloudellinen valinta, jossa on optimoitava varaosavaraston arvo tuotantomenetyksen riskiin häiriötilanteessa. Mikäli kohdetta ei ole mahdollista korjata käynnin aikana, on joko siirrettävä korjaus seuraavaan seisakkiin tai kriittisessä tapauksessa pysäytettävä prosessi korjausta varten. Viimeksi mainittua pyritään välttämään koituvien tuotannonmenetysten vuoksi.

## 2.2 Jaksotettu kunnossapito

Tuotantolaitoksissa on yleisesti käytössä jaksotetut huoltoseisakit, jolloin prosessi ajetaan alas ja kaikki suunnitellut kunnossapitotyöt tehdään seisakin aikana. Korjattavat kohteet valitaan kunnonvalvontaan tai jaksotuksen perusteella tai suoritetaan siirrettyjä korjaustoimenpiteitä, joita ovat yleensä esim. pienehköt vuodot.

Jaksotettua kunnossapitoa varten komponenteille voidaan tietyissä käyttöolosuhteissa historiatietojen perusteella määrittää vakio vaihtoväli. Vaihtoväli perustuu toisaalta myös riskiluokitteluun sen mukaan, kuinka kauan suunnitteleman seisakki kestäisi kohteen vikaantuessa yllättäen. Harvoissa tapauksissa on saatavilla niin tarkkaa tilastollista tietoa, että käyttöikä voidaan yksiselitteisesti laskea [3, s. 76]

Vaikka kokemusten perusteella jonkin kohteen käyttöikä tunnettaisiinkin erittäin tarkasti, jolloin määräaikaishuoltosuunnitelman tekeminen on helppoa, on silti pyrittävä parantamaan, joko alentamaan kustannuksia tai pidentämään huoltoväliä. Vakio huoltovälillä ja huoltotoimenpiteillä kustannukset ovat pitkällä aikavälillä kasvavia, kun teollisuudessa kustannusten tulisi jatkuvasti laskea, jotta kilpailukyky säilyisi.

### 2.3 Parantava kunnossapito

Parantavan kunnossapidon suurin ero muihin kunnossapitostrategioihin on teoriassa että ennakoimattoman vikaantumisen tapahtuessa, vian juurisyy olisi selvitettävä ja jollain tavalla korjattava tai poistettava. Demingin väitetään sanoneen:

"There is no substitute for knowledge."

Lausahduksen voi tulkita tarkoittavan, että ymmärtämällä systeemiä ja rakentamalla järjestelmän palvelemaan tarkoitusta, säästetään huomattava määrä työtä. Demingin lauseen onkin tulkittu olevan ristiriidassa T.A. Edisonin kanssa, jonka kerrotaan sanoneen:

"There is no substitute for hard work"

Parantava kunnossapitostrategia vaatii erityisosaamista vian syyn etsimiseen, analysointiin, korjauksen suunnitteluun ja korjaukseen. Työvoimaintensiivisten toimenpiteiden toteuttaminen on kallista, joten kunnonvalvonnan tulisi tuottaa mahdollisimman laadukasta tietoa vian etsimisen ja analysoinnin avuksi.

Ruippo [4] on käsitellyt diplomityössään saman konsernin toisen tehtaan hydraulikan kunnossapidon kehittämistä. Tuloksena korostettiin tiedon ja dokumentaation saatavuuden parantamista sekä konsernin sisäisen yhteistyön kehittämistä, toisin sanoen tiedon laadun ja saatavuuden parantamista.

### 3 ÖLJYN KUNNONVALVONTA

Työn kohteena olevalla tehtaalla on noin 130 erilaista hydraulikkajärjestelmää ja suuri määrä erilaisia öljyvoideltuja kohteita. Kunnonvalvontamenetelmiä vertailtaessa pyrittiin löytämään mittauksia, jotka olisivat sovellettavissa kaikkiin erilaisiin järjestelmiin.

Työn rajaamiseksi parhaan hyödyn antavaksi kunnonvalvontakohteeksi valittiin hydraulioöljyn kunnonvalvontamittaukset. Öljyn kunnonvalvontaan on saatavilla paljon erilaisia mittausmenetelmiä, joista oli valittava potentiaalisesti eniten lisäinformaatiota pienimmillä kustannuksilla tuottavat menetelmät. Kustannustehokkuusvaatimuksen vuoksi mittauslaitteiston investointikustannus nousi tärkeimmäksi kriteeriksi, koska kalliimpien ja mahdollisesti tarkempien mittalaitteiden pitkällä aikavälillä tuottamia hyötyjä on vaikea arvioida etukäteen.

Tehtaalla oli jo kokemusta partikkelimäärän, viskositeetin ja öljyn vesipitoisuuden mittaamisesta. Tarkastelussa kyseiset suureet osoittautuivat hyväksi indikaattoreiksi, mutta mittausten luotettavuutta oli kehitettävä, jotta tuloksia pystyisi käyttää hyväksi huollon suunnittelussa [5]. Myös muiden menetelmien, kuten dielektisyys- [6], ja painemittausten [5] käyttöä arvioitiin.

Eniten kehitettävää todettiin olevan partikkelianalyysissä, josta toivottiin konkreettista tietoa laitteiden mekaanisen kunnon selvittämiseen ja ennustamiseen.

#### 3.1 Partikkelilaskentamenetelmät

Partikkelilaskentaan on saatavilla eri tekniikoilla toimivia laitteita. Mittaustulokset ilmoitetaan yleensä ISO4406-standardin mukaisena puhtausluokkana, jonka avulla ilmoitetaan yli 4, 6 ja 14 mikrometrin kokoisten partikkelien lukumäärä näytteessä. Puhtausluokituksen käyttämiseksi kunnonvalvonnessa, tulisi jokaiselle kohteelle olla puhtausavoite, joka perustuu järjestelmän ominaisuuksiin ja suodatustasoon [8, s. 23]. Puhtausavoitteen ylittäminen toimii impulssina kunnossapitotoimenpiteiden aloittamiseksi. Jotta impulssi voi johtaa suoraan korjaustoimenpiteisiin, järjestelmän toiminta ja vikaantumiskäyttäytyminen tulee olla tunnettu lähes optimaalisella tavalla, jotta korjaustoimenpide voidaan kohdistaa oikeaan komponenttiin. Kunnossapitotoimenpide voi olla myös järjestelmän tarkempi seuraaminen tai muu analyysi.

Nikkilän [9] mukaan järjestelmän ominaispuhtausaso määräytyy pääasiassa valitun suodattimen mukaan, lisäksi puhtausasoon vaikuttavat järjestelmässä alun perin olevat partikkelit, ulkopuolelta kulkeutuvat partikkelit ja kulumisesta johtuvat partikkelit. Nikkilän mukaan järjestelmä palaa ominaispuhtausasolleen melko nopeasti, vaikka puh-



tautta väliaikaisesti parannettaisiin esim. ylimääräisellä suodatuksella tai järjestelmään pääsisi hetkellisesti ulkopuolisia partikkeleita. Puhtaustavoitteen asettaminen ilman vertailutietoja laitteen normaalista käytöstä on vaikeaa. Kunnossapitotoimenpiteiden määrittäminen laitteelle jonka ominaispuhtaustaso on pitkän käyttöiän myötä kohonnut, on hankalaa, koska laite saattaa toimia moitteetta myös kohonneella partikkelitasolla. Turhien kunnostustoimenpiteiden suorittaminen öljyn kunnonvalvonnan perusteella alentaa kunnonvalvontajärjestelmän uskottavuutta ja kyseenalaistaa muiden mahdollisesti kriittisempien korjaustöiden tekemisen.

Erityisen tärkeään rooliin nousee kysymys: "Mitkä ovat toimenpiteet, jos puhtaustavoite ei täyty?". Ilman selkeää toimenpidesuunnitelmaa koko puhtaustavoitteeseen perustuva kunnonvalvontajärjestelmä jää kyseenalaiseksi.

### **3.1.1 Paine-eroon perustuva partikkelilaskentamenetelmä**

Tehtaalla on käytössä paine-eroon perustuva mittalaite, jonka antamat tulokset eivät ole riittävän tarkkoja käytettäväksi yksistään ennakkohuollon suunnittelussa tai vika-analyysissä.

Näyte suodatetaan mitattavaa partikkelikokoa edustavan metalliverkkosuodattimen läpi. Suodattimen tukkeutumista mitataan paine-antureilla tiettyä öljytilavuutta kohti ja puhtaustuokka päätellään lopullisesta paine-erosta suodattimen yli. Menetelmän ei pitäisi reagoida näytteen sisältämään ilmaan tai veteen. Käytännössä ongelmaksi muodostui tilanne, jossa näytteen imuletku nousee näytteen öljynpinnan yläpuolelle ja mittalaitteeseen pääsee vapaata ilmaa. Mittausvirhe ei aina aiheuta hälytystä, vaan saattaa antaa väärän tuloksen [5]. Myös metalliverkkosuodattimen tukkeutuminen varsinkin korkeamman viskositeetin (>100 cSt) öljyillä oli testausrutiineja hankaloittava ongelma. Tukkeutumisongelman vuoksi oli suositeltavaa tarkastaa öljy karkeasti suodattamalla se ensin membraanille ja tekemällä karkea arvio puhtaudesta. Suoraan öljystä tehtävillä partikkelimittauksilla olisi kuitenkin tarkoitus säästää analyysiin kuluva aikaa, joten olisi yksinkertaisempaa laskea partikkelit membraaninäytteestä, jos sellainen joudutaan preparatoimaan.

### **3.1.2 Partikkelien kokojakauma**

Ihanamäen [10, s. 75] mukaan järjestelmässä olevat partikkelit jauhautuvat ajan kuluessa pienemmiksi hiukkasiksi, jotka myös helpommin läpäisevät suodattimen. Järjestelmässä ominaisesti esiintyvien partikkelien kokojakauma on silloin painottunut pienempiin hiukkasiin. Rakenteissa tapahtuva eroosio nostaa suurten hiukkasten suhteellista määrää, jolloin suurten hiukkasten suhteellisen määrän kohoamisen voidaan tulkita olevan merkki eroosiosta järjestelmässä.

### 3.1.3 Mikrokooppilaskenta

Sovellettavaksi partikkelilaskentamenetelmäksi valittiin mikrokooppilaskenta, koska haluttiin mahdollisuus myös partikkelien laadulliseen analysointiin. Myös investointikustannus on yksinkertaiselle laitteelle muita menetelmiä alempi. Standardi ISO 4407 määrittelee mikrokoopilla tehtävän partikkelilaskennan menetelmän.

Mikrokooppilaskentaa varten öljynäyte suodatetaan membraanikalvon läpi. Suodoksesta voidaan tehdä karkea arvio puhtaustasosta silmämääräisesti suodoksen värin ja hienojakoisuuden perusteella. Ihanamäki on käsitellyt diplomityössään partikkelien kvalitatiivista eli laadullista analyysiä. Laadullisen analyysin avulla voidaan erottaa erilaisia kulumismuotoja, kuten laakeripintojen väsymiskuluminen, adhesiivinen kuluminen, hapettuminen, eroosiokuluminen [10, s. 76] ja eri materiaalit kuten rauta, kupari, alumiini kvartsi, polymeerit ja kuidut [10, s. 69]

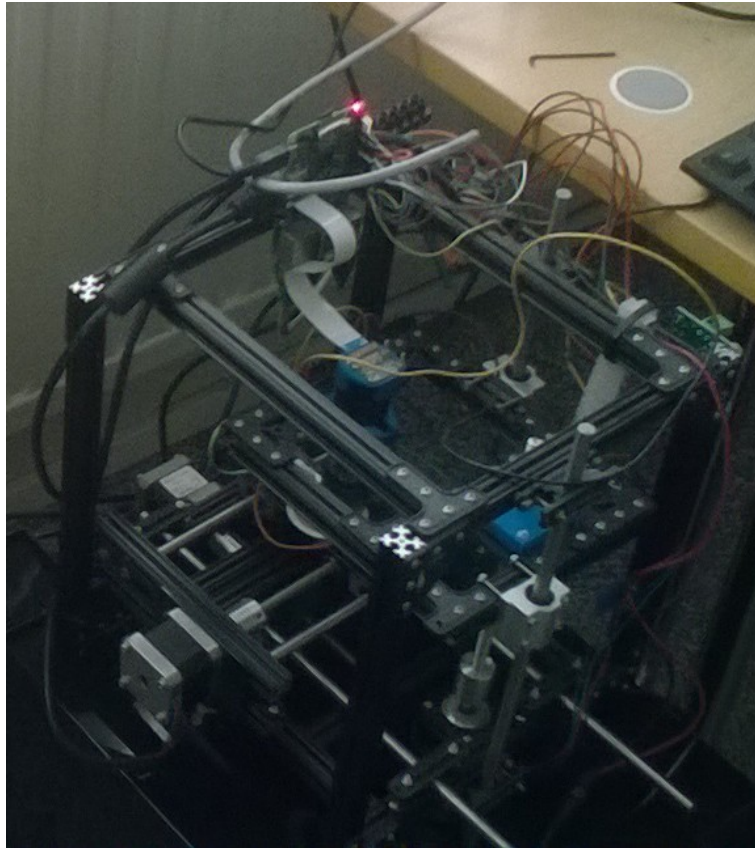
## 3.2 Partikkelianalyysi open-source mikrokoopilla

Mikrokooppimenetelmää varten löytyi myös valmiiksi tarvikkeita, näin tavoiteltiin kustannussäästöjä. Koska kunnonvalvontamittausten kokonaiskustannuksiin on laskettava myös mittausten tekemiseen menevä aika, on laskennasta saatava mahdollisimman automatisoitua.

Esikuva mikrokoopille löytyi Cambridgen yliopiston OpenLabTools-projektista [17], jossa on dokumentoitu tarvittava runko, optiikka, elektroniikka sekä lähtökohdat kuvankäsittelyyn.

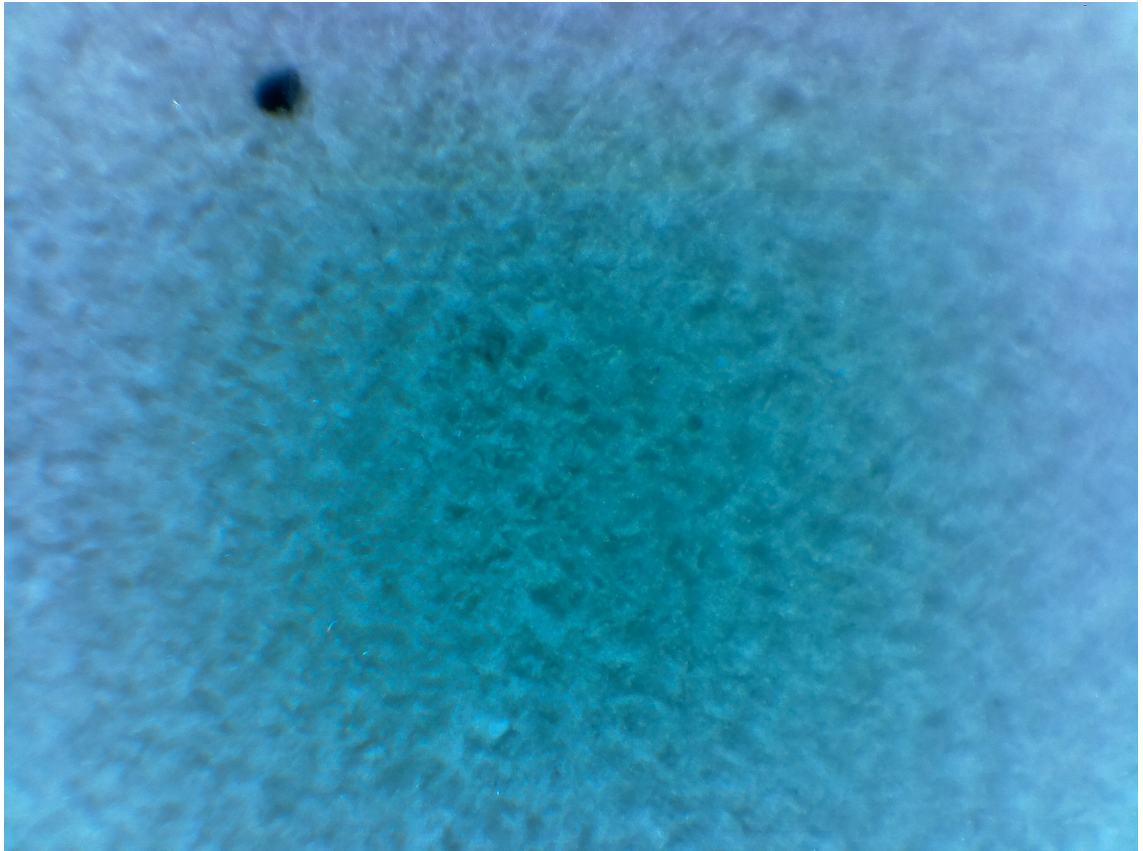
### 3.2.1 Mikrokoopin rakenne

Mikrokoopin runko rakennettiin OpenBeam-alumiiniprofiilista. Liukujohteet X-, Y- ja Z-tasolle tehtiin vedetystä terästangosta, johon on saatavilla millimittaisia laakerointeja. Tasojen liikutteluun käytetään normaalia M8 kierretankoa ja mutteria. Mutterit on lukittu XYZ-tasoihin 3D-tulostetuilla soviteosilla, joiden läpi kierretanko liikkuu. Tasojen liikutteluun käytetään NEMA17-askelmoottoreita, joiden resoluutio on 200 askelta/kierros. Teoriassa M8 kierretangon nousu on 1,25 mm/kierros, jolloin yksi askel on 6,25 mikrometriä. Käytännössä asemointitarkkuuden ja kierretangon välyksen aiheuttama virhe on merkityksetön laskentatuloksen kannalta.



*Kuva 0. Mikroskooppi koottuna.*

Optiikaksi valittiin 160 mm putkelle tarkoitettu 10x objektiivi. Valittu 1/4 tuuman kokoinen CMOS-kameramoduuli on sijoitettu suoraan objektiivin taakse n. 60 mm päähän. Kameramoduulin resoluutio on 2592x1944 pikseliä, josta käytössä on neljäsosa eli 1296x972. Käytettäessä täyttä resoluutiota valovoima heikkenee moduulin ulkoreunoja kohti, jolloin laskettu partikkelimäärä on suurempi moduulin keskellä (Kuva 1):

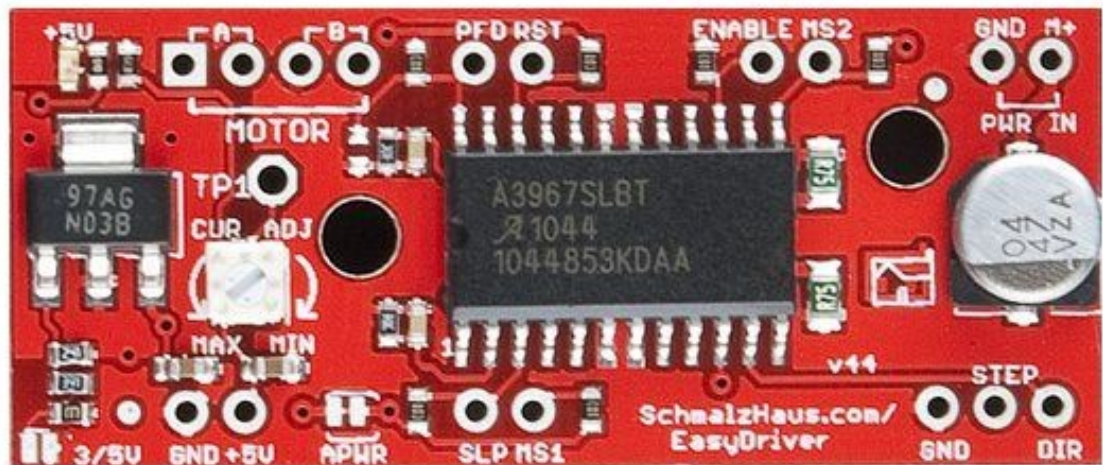


*Kuva 1. Esimerkki 2592x1944 resoluutioisesta kuvasta.*

Ongelman välttämiseksi käytetään laskennassa vain moduulin keskikohtaa, jolloin kuvista saadaan valotuksen suhteen homogeenisempiä, mutta saman pinta-alan kattamiseksi membraanilla on otettava suurempi määrä kuvia. Objektiivin läpi mitattiin kalibrintiliuksen avulla todelliseksi resoluutioksi  $0,29 \mu\text{m}/\text{pikseli}$ , joka todettiin riittäväksi kun halutaan laskea partikkeleita joiden koko on yli 4 mikrometriä. Pintavalonlähteenä toimivat LED:it on kiinnitetty suoraan objektiiviin 3D-tulostetun pidikkeen avulla.

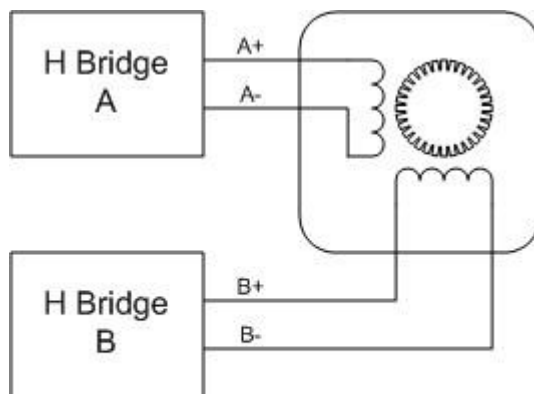
### 3.2.2 Mikroskoopin ohjaus

Ohjausalgoritmin suorituksesta vastaa Raspberry pi B+ minitietokone, jossa on liitänä 5 Megapikselin kameramoduulille sekä 28 kpl 3.3V digitaalisia ulostuloja, joita voidaan ohjata Python-kielen Rpi.GPIO-kirjaston [27] avulla. Digitaalisten lähtöjen kautta ohjataan askelmoottoreita, jotka ohjaavat näytteen asemaa XYZ-tasossa. Askelmoottoreiden virransyötöstä vastaavat EasyDriver-ohjainkortit, jotka perustuvat Allegro A3967 -mikropiiriin (Kuva 2).



Kuva 2. EasyDriver-ohjain. Askelmoottorin johdot kytketään A ja B -pinneihin. Syöttöjännite 5V kytketään oikeaan yläkulmaan ja ohjausjännite 3.3 V Step-pinniin.

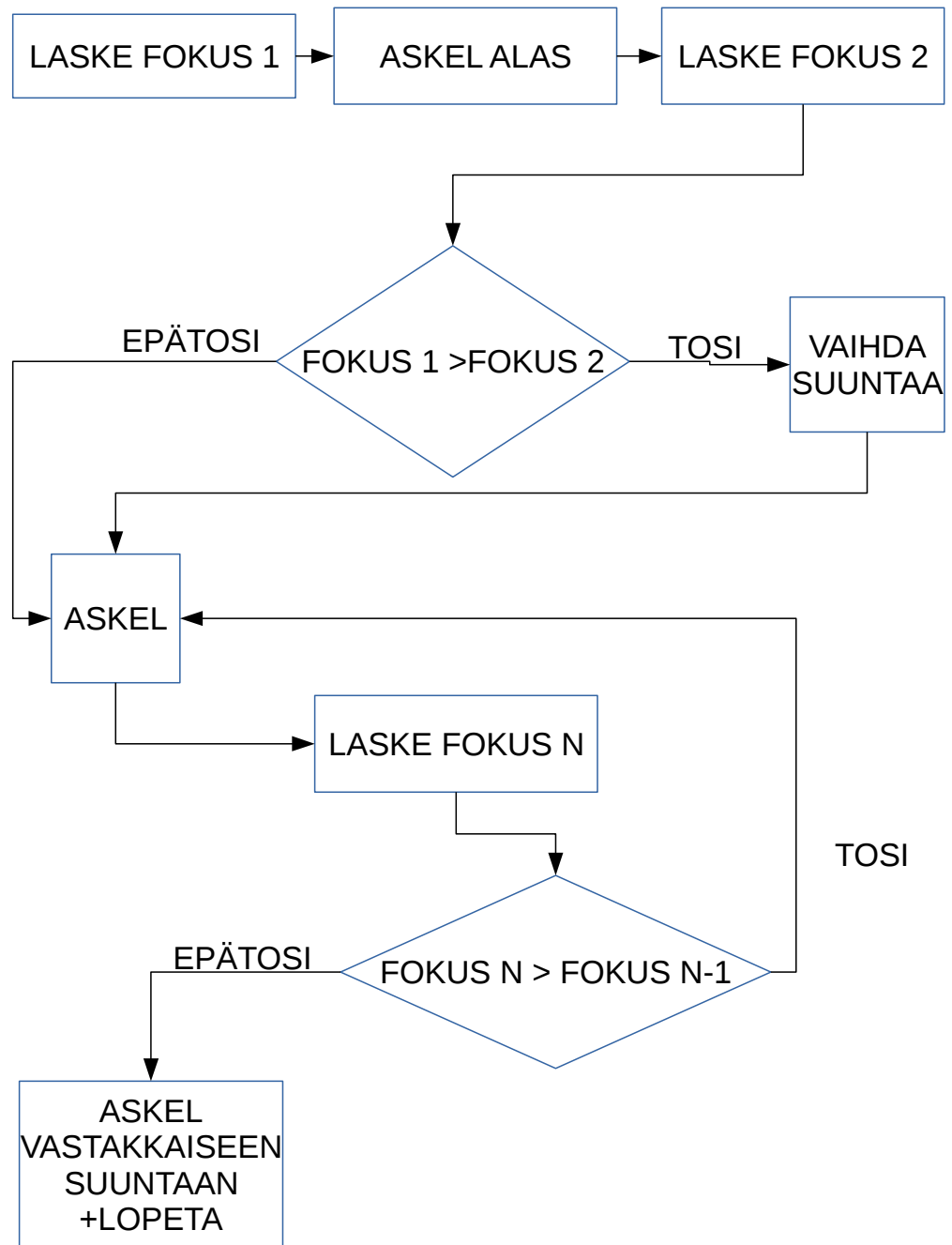
Ohjainkortti on kytketty kaksikäämiseen NEMA17-askelmoottoriin, josta toinen käämi on vuorollaan jännitteellinen. Jännitteellisen käämin vaihto siirtää ratasta yhden askeleen eteenpäin (Kuva 3).



4 Wire Stepper Motor (Bipolar)

Kuva 3. Askelmoottorin käämit ja kytkennät.

Raspberry pi:n digitaalinen ulostulo on kytketty ohjainkortin STEP-pinniin. Vaihtamalla ulostulo kerran jännitteettömäksi ja sen jälkeen jännitteelliseksi, saa askelmoottorin ottamaan yhden askeleen. Liikkeen tuottaminen askelmoottorilla valmiin ajurikirjaston avulla on helppoa. Eniten työtä vaatinut osa-alue ohjauksessa oli objektiivin pitäminen fokuksessa Z-suunnassa, liikuttaessa mitattavan alueen yli XY-tasossa. Ongelma ratkaistiin laskemalla kuvan fokus liikuttaen samalla objektiivia Z-suunnassa vuokaavion (Kuva 4) mukaisesti.



Kuva 4. Logiikkakaavio kuvan tarkentamiseksi.



Fokukselle lasketaan numeerinen arvo kuvasta, joka muutetaan 8-bittiseen harmaasävyvuotoon. Käytännössä harmaasävykuva on 1296x972 matriisi, jonka solut saavat arvoja väliltä 0-255, jossa 0 tarkoittaa mustaa pikseliä ja 255 valkoista. Terävyys voidaan laskea kuvan yli sävyn muutosnopeuden eli gradientin avulla. Gradientti lasketaan numpy.gradient [25] -funktiolla, joka palauttaa solun numeerisen muutosnopeuden seuraavaan soluun nähden x ja y suuntaan. Näin 1296x972 matriisista palautuu kaksi gradienttimatriisia.

$$\nabla A = \partial_y, \partial_x \quad (1)$$

Jotta matriiseista saataisiin skalaariluku F, lasketaan matriisien neliösummat yhteen.

$$F = \sum \sqrt{\partial_y^2 + \partial_x^2} \quad (2)$$

Saaduissa luvuissa suurempi summa tarkoittaa parempaa fokusta. Esimerkkinä 3x3 matriisin numeerinen gradientti kaavan 1 mukaan:

$$\nabla \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Saaduille matriiseille kaavan 2 mukaiset neliösummat ovat:

$$\sum \sqrt{\begin{vmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}^2} = \sum \sqrt{\begin{vmatrix} 30 & 30 & 30 \\ 30 & 30 & 30 \\ 30 & 30 & 30 \end{vmatrix}} \quad (4)$$

Ja edelleen:

$$\sum \begin{vmatrix} \sqrt{30} & \sqrt{30} & \sqrt{30} \\ \sqrt{30} & \sqrt{30} & \sqrt{30} \\ \sqrt{30} & \sqrt{30} & \sqrt{30} \end{vmatrix} = 9 * \sqrt{30} = 49,295 = F \quad (5)$$

Kuvan tarkkuuden huonontuessa intensiteetin erot pienenevät. Esimerkiksi vastaava matriisi voisi olla:

$$F\left(\begin{vmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 8 \end{vmatrix}\right) = 42,804 \quad (6)$$

Käyttämällä hyväksi tarkkuuden eron tuottamaa intensiteettivaihtelua, voidaan objektiivisesti tarkentaa sopivalle etäisyydelle vuokaavion (Kuva 4) mukaan.

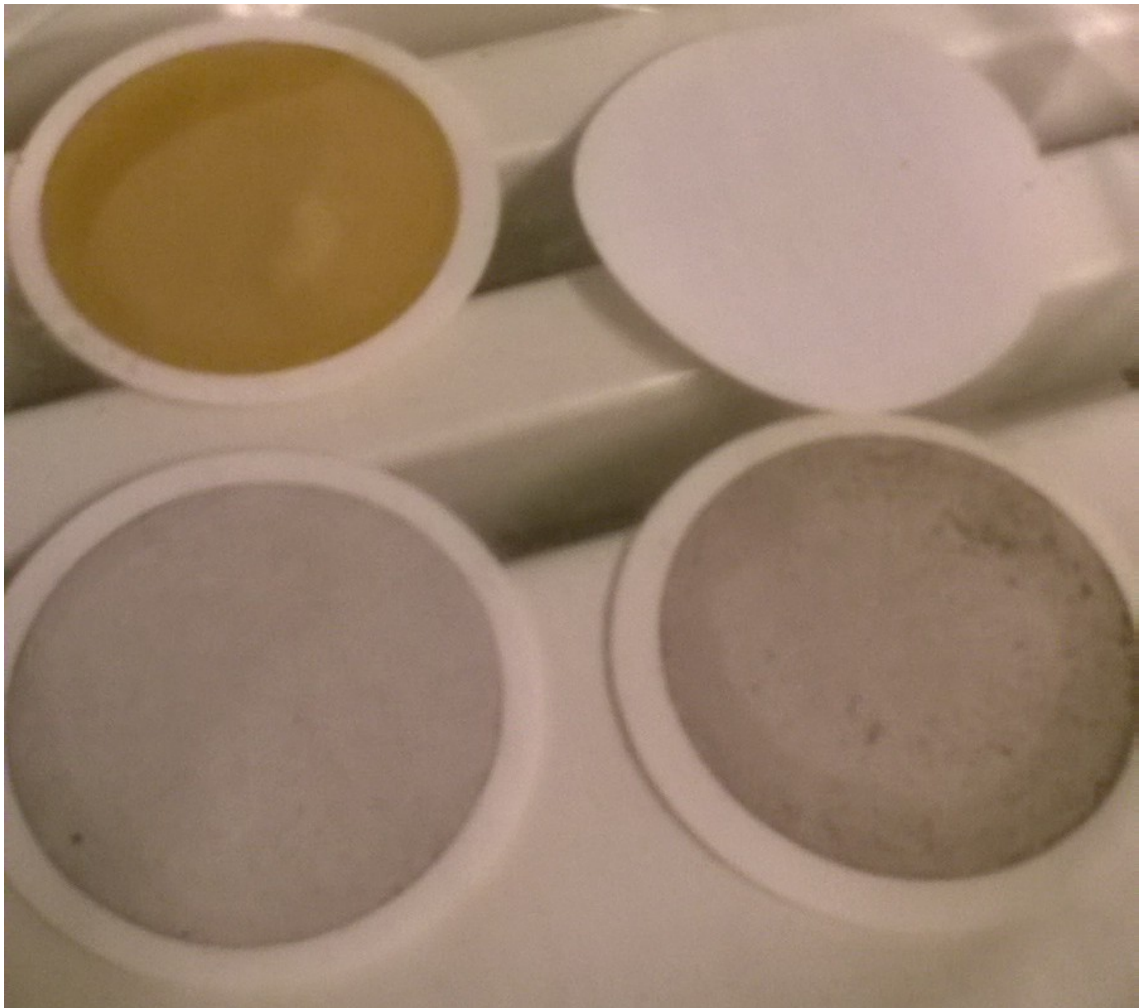
### 3.2.3 Näytteen preparointi

Ennen partikkelilaskentaa öljynäyte on suodatettava membraanikalvon läpi. Varsinkin korkeaviskositeettisten vaihteistoöljyjen suodattavuus muodostui ongelmaksi, joten membraanin valinnassa oli tehtävä kompromissi pienimmän mahdollisen laskettavan partikkelin ja suodatusajan suhteen. Saatavilla oli 12 mikrometrin selluloosaniitraattimembraaneita, joten valinta oli helppo.

Lähtökohtaisesti näytettä otetaan 500 ml, joka sekoitetaan samaan tilavuuteen puhdasta valopetroolia suodattuvuuden parantamiseksi. Näyte imetään membraanin läpi alipaineen avulla ja huuhdellaan vielä puhtaalla valopetroolilla membraanin värin homogenisoimiseksi. Näyte kuivataan lämpökaapissa ennen partikkelilaskentaa. Tarkemmat ohjeet näytteen preparoimiseksi ovat liitteessä A.

Membraanin pintaan jäävästä väristä saadaan hyvä kuva öljyn kuluneisuudesta värin ja kiintoaineen perusteella (Kuva 5).





*Kuva 5. Kuivattuja membranikalvoja. Vasemmalla ylhäällä näyte positiosta 0120686, vasemmalla alhaalla 12250302, oikealla alhaalla 12250202, oikealla ylhäällä puhtaalla valopetrolilla suodatettu vertailunäyte.*

Kuvan 5 näytteistä 12250302 oli merkintöjen mukaan 1,5 vuotta vanhaa ja 12250202 3 vuotta vanhaa. Näytteestä 0120686 suodattui ainoastaan 250 ml.

### **3.2.4 Kuvankäsittely ja partikkelilaskenta**

Kuvankäsittelyä ja laskentaa varten membraanin pinnasta otetut kuvat siirretään laskentatietokoneelle. Kuvien käsittelyyn käytetään vapaan lähdekoodin ohjelmistoa imageJ. Ohjelmalla saadaan taustasta intensiteetiltään eroavat alueet rajattua laskentaa varten. Näin voidaan toimia erikseen taustaa tummemmille ja taustaa vaaleammille eli kiiltäville partikkeleille. Tarkempi kuvaus käsittelyprosessista on liitteessä B. Käsittelystä kuvasta lasketaan partikkelit imageJ:n partikkelilaskentaominaisuuden avulla. Tuloksena saadaan taulukko, jossa on kunkin partikkelin pinta-ala.

Kaikista kuvista saadut Excel-tiedostot tallennetaan kansioon, josta ne Python-scriptin avulla summataan ISO 4406 mukaisiin puhtausluokkiin. Esimerkkiraportteja on esitetty liitteessä C. Raporttiin liitetään myös kuvat suurimmista lasketuista hiukkasista sekä keskimääräisistä hiukkasmäärää edustavat kuvat.

### 3.2.5 Laskennan tilastollinen tarkastelu ja virhearvio

Laskentaraaporttiin liitetään myös eri hiukkasluokkien laskettu jakauma per kuva. Jos oletetaan että partikkelit ovat levittyneet tasaisesti membranikalvon pinnalle, partikkeli-lukumäärän per kuva tulisi olla normaalijakautunut. Standardin ISO 4407 mukaan partikkelimäärä/ml voidaan laskea osamääränä (7):

$$N = \frac{n A}{f A_1 V} \quad (7)$$

jossa

$A_1$  on alueen pinta-ala, jolta partikkeleita on laskettu

$f$  on laskenta-alueiden kokonaismäärä

$n$  on laskettujen partikkelien määrä

$A$  on suodatuspinta-ala

$V$  on suodatettu tilavuus

$N$  on partikkelia per ml

Osamäärässä (7) termi (8) pysyy vakiona

$$\frac{A}{V A_1} \quad (8)$$

ja termi (9) on satunnaismuuttuja partikkelia per kuva.

$$N(\mu, \sigma) = \frac{n}{f} \quad (9)$$

Sopivan otannan määrittelemiseksi tehtiin stokastinen simulointi, jolla simuloitiin kaikki ISO 4406 puhtausluokat väliltä 0-27. Kohdassa 3.2.1 ilmoitetulla resoluutiolla suhde  $A / A_1$  on 12838, joka on tarvittavien kuvien määrä, jos koko 47 mm halkaisijaisen (suodattavan osuuden halkaisija 41 mm) membraanin pinta haluttaisiin kuvata.

Generoidaan Python-Numpy [25] matriisilaskentakirjaston avulla 12838 solua pitkä vektori, jonka jokaiseen soluun satunnaisgeneroidaan numpy.random.normal -funktion avulla simuloitavaa puhtausluokkaa vastaava normaalijakautunut hiukkasluku keskiarvolla (10):

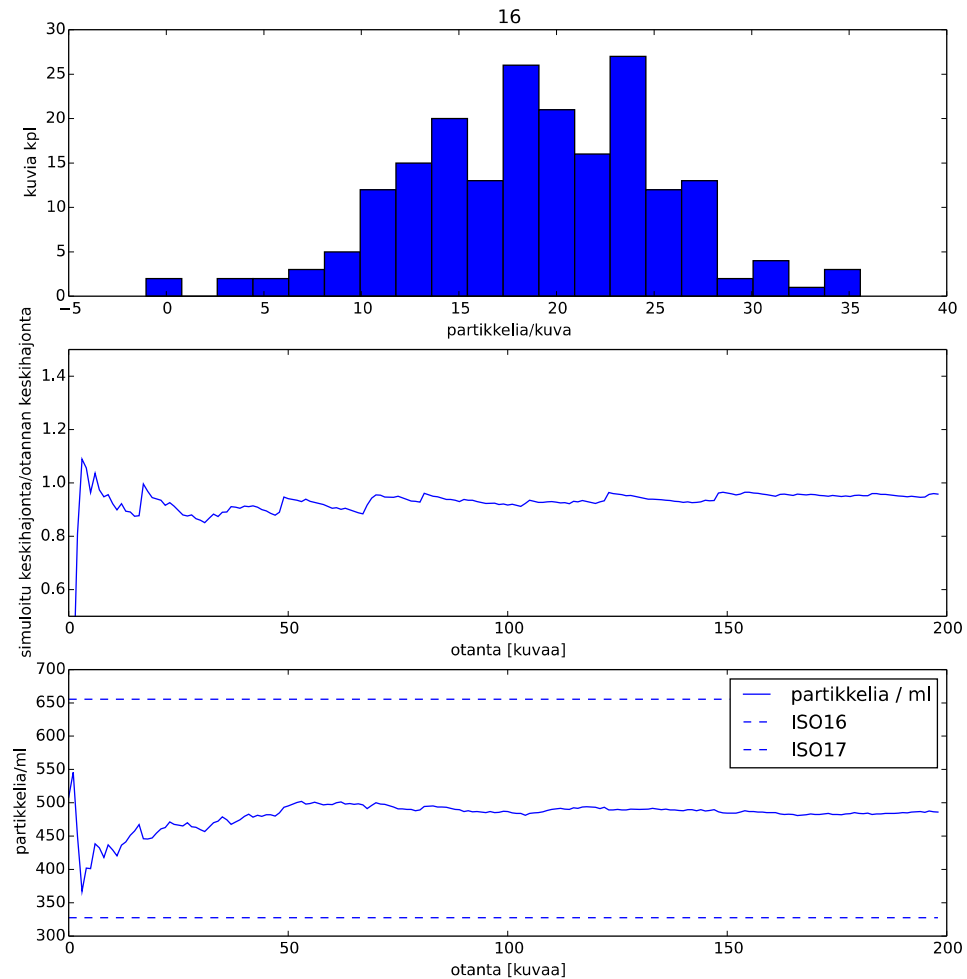
$$\mu = \frac{A_1 V N}{A} \quad (10)$$

Keskihajonta saadaan kaavan (11) mukaan

$$\sigma = 0.35 * \mu \quad (11)$$

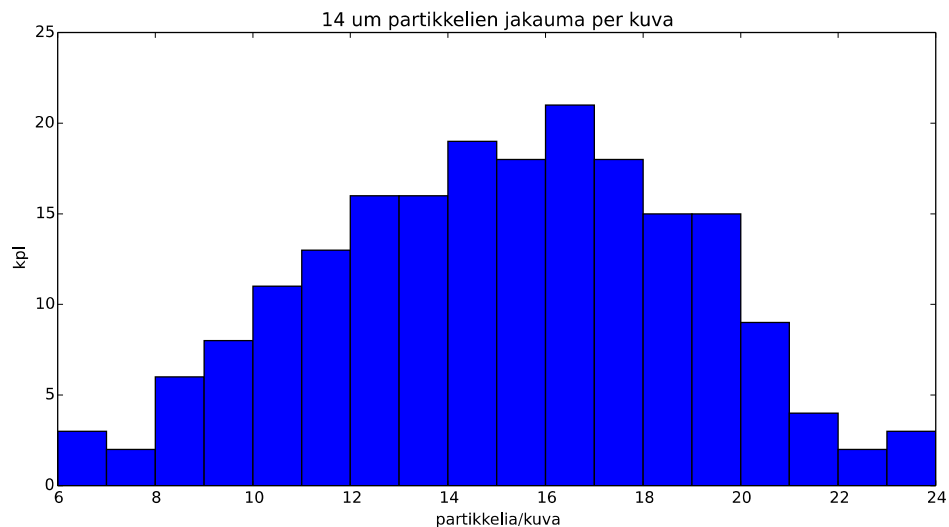
Vakio 0.35 kaavassa (11) on saavutettu kokeellisesti analysoimalla n. 1500 kuvaa eräästä näytteestä. Valitan generoidusta vektorista otos  $n=1,2,3,4...200$  ja lasketaan jokaiselle otokselle keskihajonta  $\sigma_1$  ja suhde  $\sigma_1 / \sigma$ , jolloin voimme piirtää käyrän

$(n, \frac{\sigma_1}{\sigma})$  (Kuva 6 keskellä).



Kuva 6. Ylhäällä simuloinnin jakauma partikkelia/kuva, keskellä keskihajonta otannan funktiona, alhaalla simuloitu partikkelimäärä per ml ja lähellä olevien ISO4406 luokkien rajat,

Käyrä (Kuva 6 keskellä) kuvaa otoksen keskihajonnan suhdetta koko populaation keskihajontaan, joka pysyy samana vaikka partikkelimäärän keskiarvo muuttuisi. Simuloitiin myös partikkelikonsentraatio per ml (Kuva 6 alhaalla) ja piirrettiin samaan kuvaan lähimpänä olevien ISO 4406-luokkien alarajat. Koska simuloinnin odotusarvo on luokkien keskellä, näyttäisi pienempikin otanta riittävän estämään hajonnan aiheuttaman puhtausluokan muutoksen. Tosiasiassa keskiarvo voi olla mikä tahansa luku myös luokkien rajojen läheisyydessä. Simuloinnin perusteella päätellään, että n. 100 kuvaa/näyte on riittävä otos. Piirretään myös otoksen soluista histogrammi (Kuva 6 ylhäällä), jota voidaan verrata todellisiin mittaustuloksiin (Kuva 7).

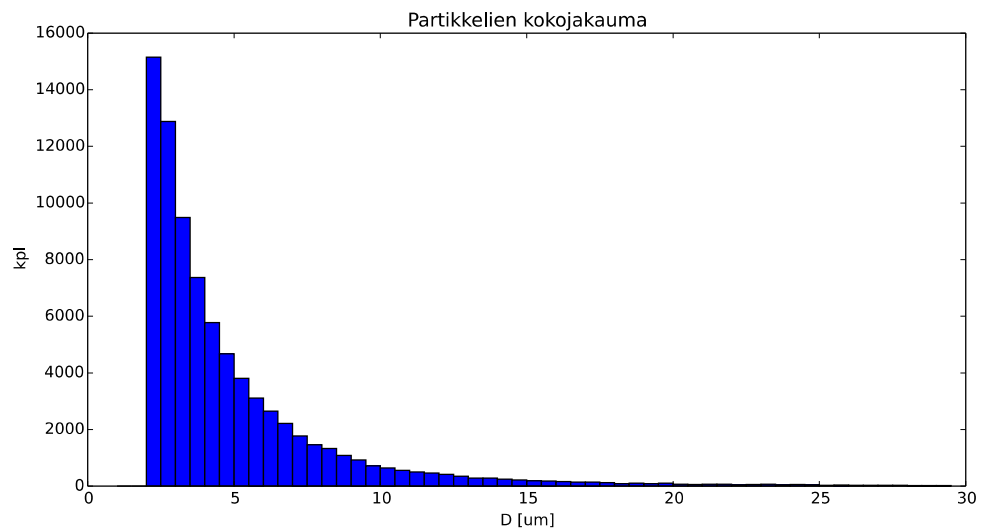


Kuva 7. Positiosta 0120648 otetun öljynäytteen yli 14 mikronin partikkelien jakauma. Näytteen yli 14 mikronin partikkelien puhtausluokka on 16 kuten simuloinnissa kuvassa 6.

Näytteiden analysoinnissa tulosten normaalijakautuneisuudesta voidaan päätellä mittausten onnistuminen. Mikäli mittaustulokset eivät ole normaalijakautuneita, on syytä epäillä virhettä joko laskennassa tai näytteen preparoinnissa. Analysoitaessa puhtaampia näytteitä on luotettavan tuloksen saamiseksi kasvatettava otantaa koska hyvin puhtaissa näytteissä keskimääräisessä kuvassa on nolla partikkeliä ja esimerkiksi puhtausluokassa 9 on alarajalla 2,5 ja ylärajalla 5,0 partikkeliä/ml. Tutkitusta 500 ml näytteestä membraanille jää kaavan (3) mukaan 0,1 partikkeliä per kuva, eli joka kymmenennessä kuvassa olisi yksi partikkeli. Tulos (ISO4406 10/9/0) saatiin suodattamalla membranin läpi puhdasta valopetrolia (Kuva 5, s. 12), otannalla  $f=200$  (Liite C). Jos halutaan jostain syystä tutkia näin puhtaita tai puhtaampia näytteitä, tulisi membranin läpi suodatettavaa näytemäärää kasvattaa.

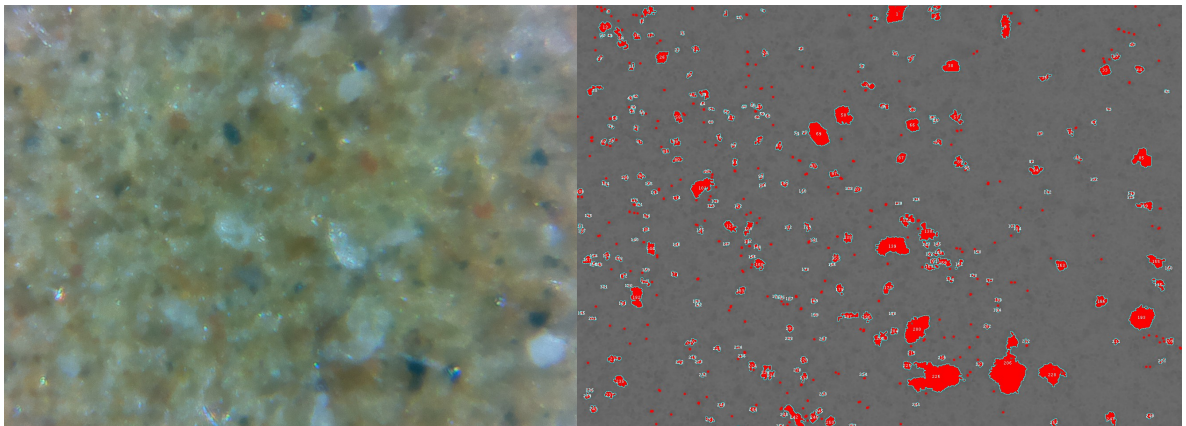
### 3.2.6 Partikkelilaskennan tulosten tarkastelu

Mikroskooppilaskennalla analysoitiin 7 vaihteistoöljynäytettä vuosihuollon yhteydessä vaihdetuista öljyistä (tulokset liitteessä C). Kuvien määräksi per näyte valittiin 200, koska haluttiin ISO 4406 -luokkien lisäksi laskea myös isoja, yli 40 mikrometrin hiukkasia, joita esiintyy näytteissä suhteessa vähän, kuten kohdassa 3.1.2 on esitetty. Partikkelien kokojakauma on jyrkästi nouseva pienempiä partikkeleita kohti, kuten Immosen mukaan [3] normaalikäytössä tilanne on (Kuva 8).



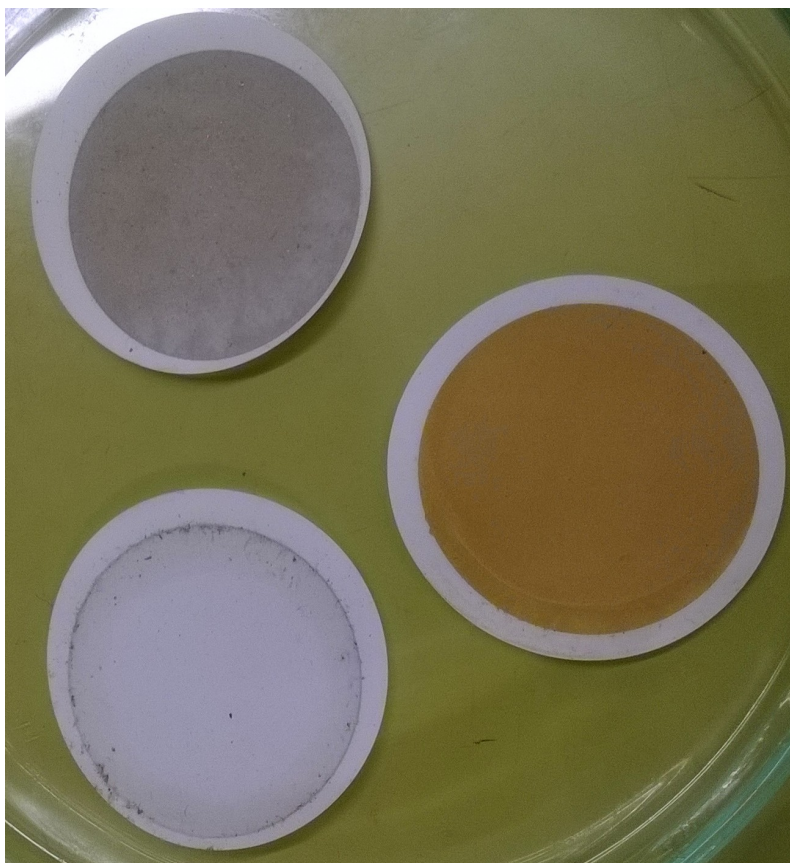
Kuva 8. Positiosta 0120648 otetun öljynäytteen partikkelien kokojakauma.

Näytteiden joukossa oli erittäin puhtaita ja erittäin likaisia näytteitä. Erittäin likaisissa tapauksissa, jolloin öljy värjää koko membranin mustaksi tai ruskeaksi, laskenta vaikeutuu merkittävästi. Laskentatarkkuuden ja laskennan robustisuuden välillä jouduttiin optimoimaan liitteessä B kuvatulla tavalla. Kuvassa 9 on esitetty positiosta 0120648 otetun näytteen yksi kuva ja kuvasta lasketut partikkelit.



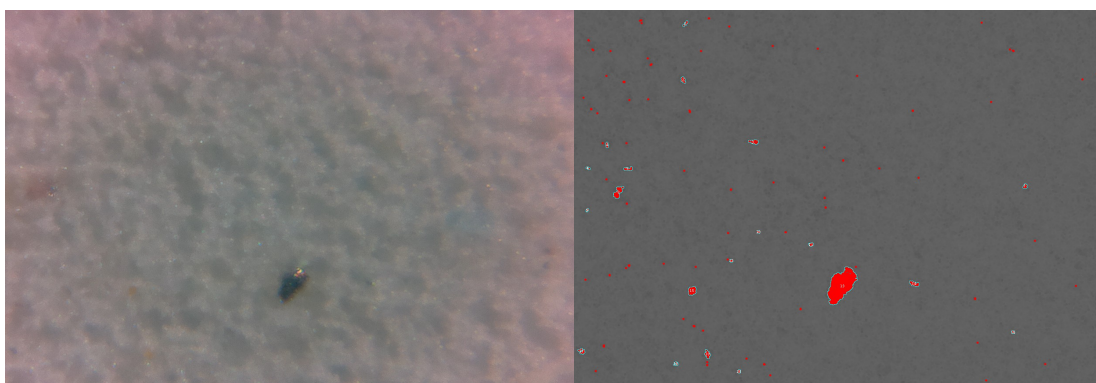
Kuva 9. Positiosta 0120648 otetun näytteen eräs kuva ja kuvasta lasketut mustat partikkelit.

Joissain kohdissa myös värjäytyneitä tummia alueita on laskettu partikkeleiksi. Hyvin likaisten näytteiden laskenta on näin osin tulkinnanvaraista. Näytteestä oli mitattu korkea vesipitoisuus 1,1 %, 500 ml näytteestä suodattui membranin läpi noin 370 ml ja suodos värjäsi membranin ruskeaksi (Kuva 10).



*Kuva 10. Membranikalvoja. Oikealla positio 0120648, vasemmalla alhaalla positio 012201-poikkileikkuri, vasemmalla ylhäällä positio 4501003.*

Kuvassa 10 on myös suhteellisen puhdas näyte positiosta 012201-poikkileikkuri, josta esimerkkikuva (Kuva 11) ja kuvasta lasketut partikkelit:

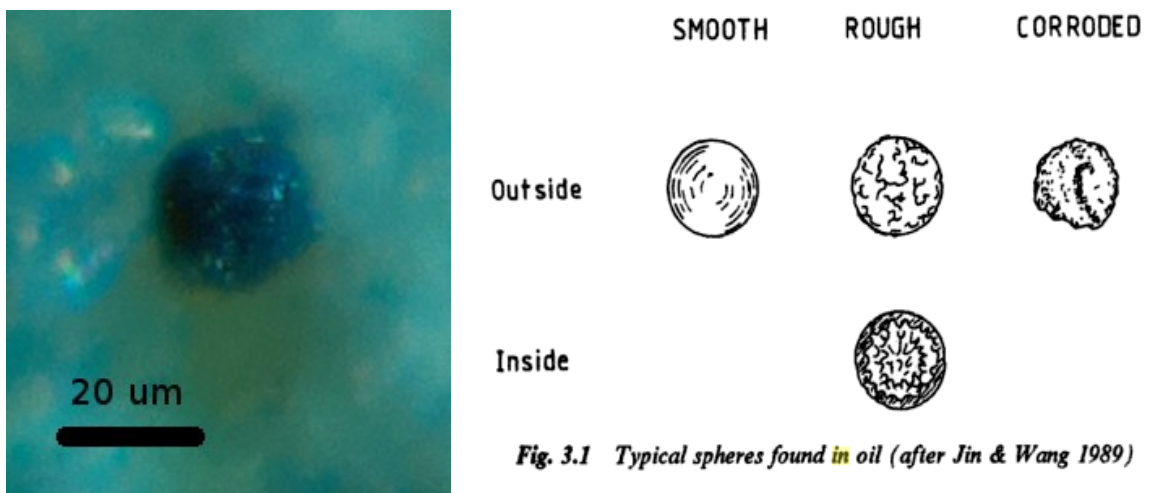


*Kuva 11. Positiosta 0120648 otetun näytteen eräs kuva ja kuvasta lasketut mustat partikkelit.*

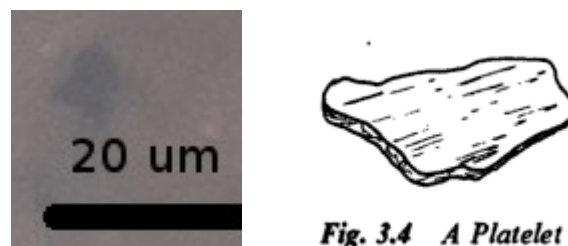


Mikroskooppilaskentamenetelmällä voidaan havaita varsin tarkasti eroja voiteluaineen puhtauden muutoksissa. Esimerkkinä käytettiin vaihteistoöljynäytteitä, koska vaihteistoöljyjä ei ole juurikaan ole kohteessa tutkittu ja oletettiin vaihteistoöljynäytteistä saatavan suurempaa hajontaa puhtaudessa, mikä auttoi laskentamenetelmän kalibroinnissa. Koska menetelmällä voidaan analysoida puhtaampiakin näytteitä aina ISO4406 10/9/0 saakka, menetelmä sopii myös suodattimella varustettujen järjestelmien tarkkailuun.

Partikkelien kvalitatiivinen tarkastelu on vielä tehtävä manuaalisesti tarkastelemalla kuvia. Tarkastelussa löytyi objekteja, joita voidaan kirjallisuudesta löydettyjen kuvausten perusteella luokitella:

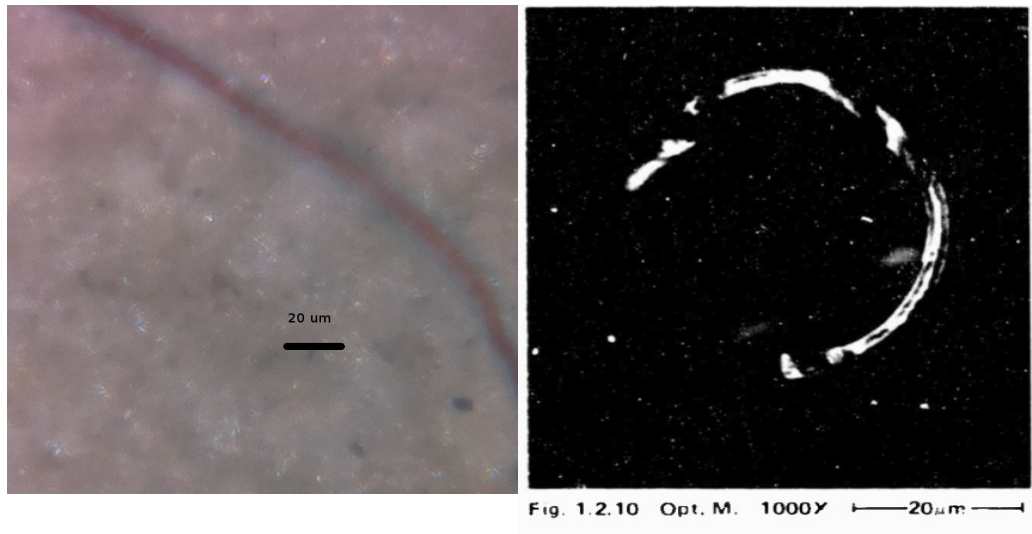


Kuva 12. Vasemmalla löydetty pallomainen kulumispartikkeli. Oikealla kirjallisuudessa esitettyjä laakeripinnan väsymiskulumiselle ominaisia hiukkasia [22, s. 38].



Kuva 13. Vasemmalla teräväreunainen levymäinen partikkeli. Oikealla normaali levymäinen kulumispartikkeli. [22, s. 42]





*Kuva 14. Vasemmalla pitkä leikkautumispartikkeli. Oikealla nauhamainen kulumispartikkeli, joka syntyy kovien partikkelien leikatessa laakeripintaa. [23, s.19]*

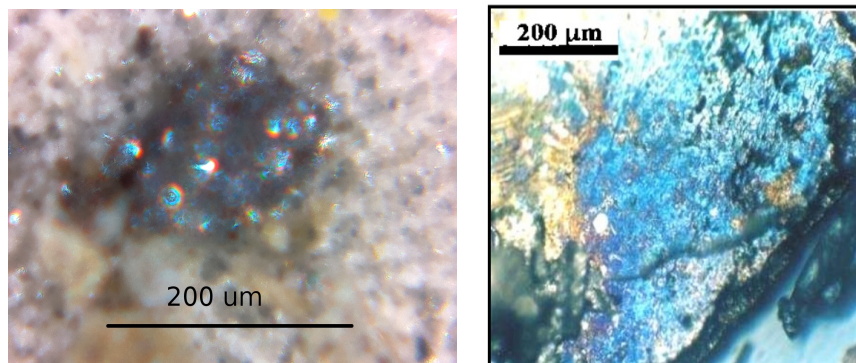


Fig. 4 High alloy steel wear particle.

*Kuva 15. Vasemmalla osin kiiltävä teräspartikkeli, mikroskoopin valaisu tapahtuu sinisellä valolla. Oikealla teräspartikkeli, hapettunut teräs ei heijasta valoa. [24, s. 18]*

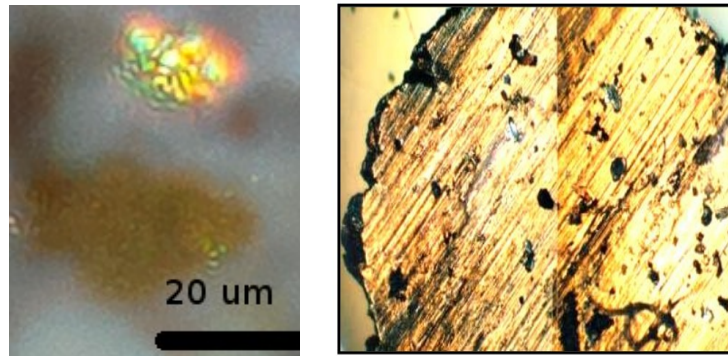
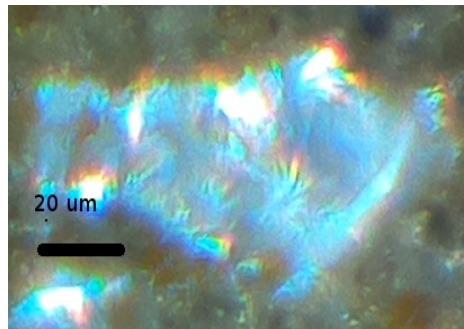


Fig. 9 Copper wear particle.

*Kuva 16. Vasemmalla näyttestä löytynyt kuparinkiiltoinen partikkeli, oikealla kupari-partikkeli [24, s. 19].*

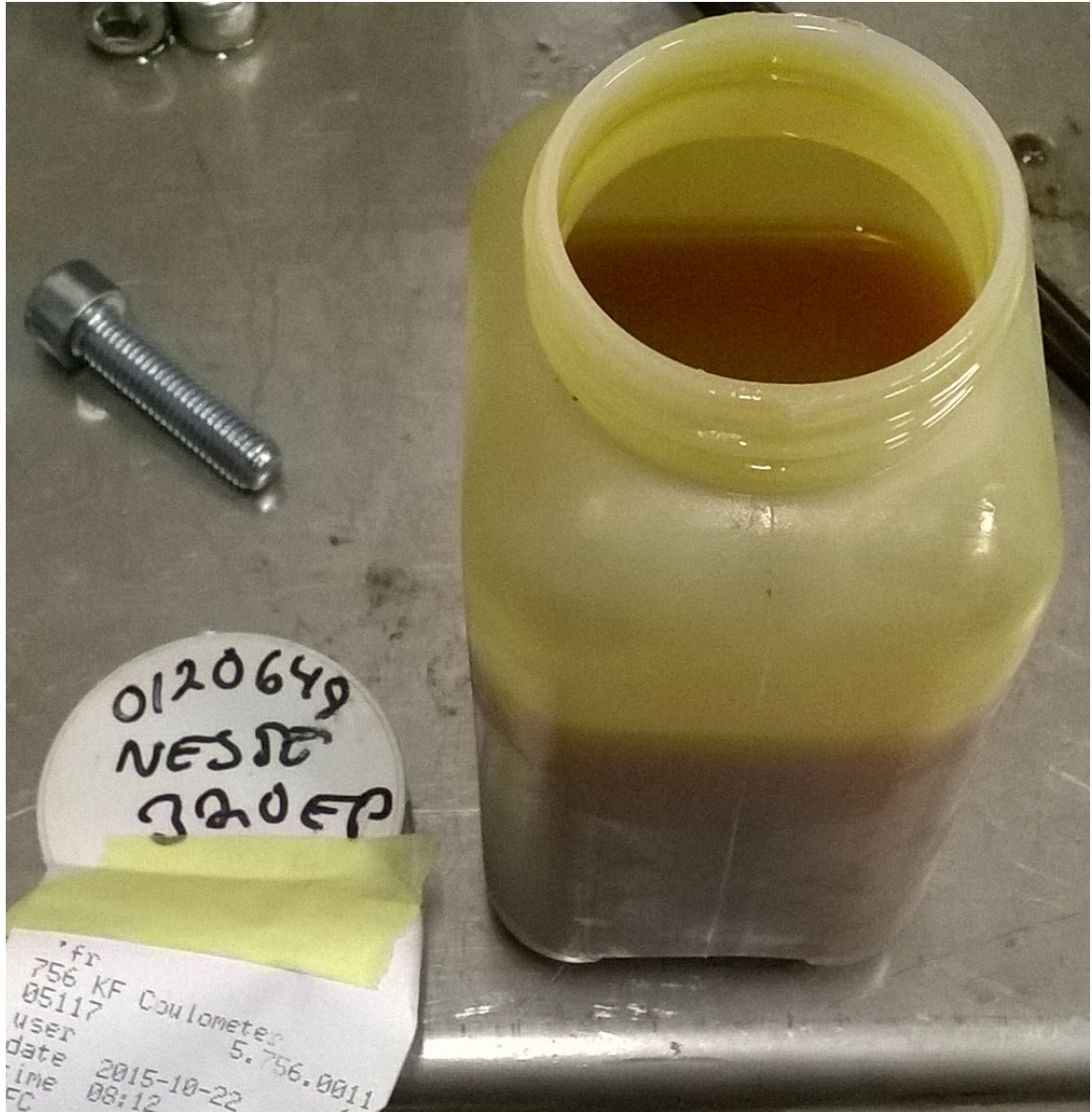


*Kuva 17. Kvartsi tai piikide eli hiekkaa [10, s. 102]*

Kvalitatiivinen analyysi vie aikaa ja vaatii erityisosaamista. Laskenta-algoritmi erittelee löydettyt kirkkaat partikkelit mustista. Laadullisen analyysin automatisointia tulisi edelleen kehittää.

### 3.3 Vesipitoisuuden mittaus

Hydrauli- ja voitelujärjestelmissä esiintyy kiinteiden epäpuhtauksien lisäksi vettä vapaassa tai sitoutuneessa muodossa. Satunnaisotannassa vaihdettuja vaihteistoöljyjä löytyi silminnähden vettä sisältäviä näytteitä (Kuva 18).



*Kuva 18. Vettä sisältävä näyte on selkeästi kermanvärinen ja samea. Karl Fischer menetelmällä tehty vesipitoisuusmittaus näytti 1,1 %.*

Tutkitut vaihdelaatikat ovat toistensa läheisyydessä. Veden päätyminen vain tiettyihin laatikoihin tulisi selvittää mittaamalla vesipitoisuuksia tasaisin väliajoin ongelmakohteissa. Myös joissain hydraulikoneikoissa on esiintynyt vettä, jonka alkuperää ei ole

pystytty varmuudella selvittämään. Tehtaalla on laboratoriossa käytössä Karl-Fischer-coulometri, jonka avulla näytteen vesipitoisuus voidaan selvittää. Laboratoriomittaus on kuitenkin liian työläs jatkuvaan kunnonvalvontaan. Tehtaalla on myös käytössä Pall PCM 400 -analysaattori, jossa on sisäänrakennettu anturi mittaamaan suhteellista kosteutta. Analysaattorissa on myös partikkelilaskentaominaisuus (Luku 3.1.1). Korkean viskositeetin vaihteistoöljyjä ja likaisia näytteitä analysoitaessa analysaattori usein tukkeutuu eikä mittaustulosta saada. Likaisten näytteiden analysointiin tulisikin hankkia sopiva anturi, jotta eri kohteiden vesipitoisuutta voidaan helposti kontrolloida ja selvittää. Sellaisissa kohteissa joissa syytä veden pääsyyn järjestelmään ei saada selville, tulisi siirtyä on-line mittauksiin joita varten on saatavissa sopivia antureita.

Immosen [3, s.48] mukaan jo pienissä konsentraatioissa vesi heikentää öljyn voitelukykyä ja lyhentää laakereiden kestoikää, suurissa vesipitoisuuksissa komponentin vauriokertymä on Immosen mukaan suuri myös lyhytaikaisessa käytössä. Toisaalta Harikan [12] tutkimuksessa liukulaakereita kuormitettiin huomattavia määriä vettä sisältävällä emulsiolla, tutkituissa laakereissa ei havaittu välitöntä kulumista tai vauriota. Tutkimuksessa esitettiin, että vesi-öljy emulsion voitelukalvon paksuus ei ole alempi, kuin puhdaan öljyn voitelukalvo, ja laakereille ei lyhytaikaisessa käytössä koituisi haittaa vettyneestä öljystä. Castrolin teettämän tutkimuksen [15] mukaan, saturaatiopisteen ylittävä, emulsioiva vesipitoisuus ei elastohydrodynaamisessa tapauksessa lisäisi kitkaa. Vesipitoisuuden vaikutuksesta laakerien käyttöikään tehdyt tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa väsymiskestävyyden muutoksien tutkimiseen [14]. Pitkässä juoksussa vesipitoisuus lyhentää laakerin käyttöikää monella eri mekanismilla, kuten korroosio, hapettuminen ja vetyhalkeilu [13]. Lyhytaikaisen vesipitoisen öljyn käytön vaikutuksia tulisi tutkia enemmän, koska jos vettä voitaisiin turvallisesti poistaa käytön aikana, ei öljyn vesipitoisuuden nousun takia välttämättä tarvitsisi pysäyttää tuotantoa.

### 3.3.1 Veden poistaminen öljystä

Öljyn joukkoon päätyneen veden poistamiseksi on tehtaalla käytössä Facor 960 -alipainehöyrystin (Kuva 19). Höyrystimen imu- ja paluuletkut (A ja C, Kuva 19) liitetään öljytankkiin joka halutaan puhdistaa vedestä. Esilämmitin (H, Kuva 19) tulisi säätää lämmittämään öljy 75 asteeseen ennen alipainekammiota. Alipainepumppu (P2, Kuva 19) pitää yllä 0,2 baarin painetta reaktorissa, jolloin öljyssä oleva vesi höyrystyy alemmassa lämpötilassa. Veden ominaishöyrystyslämpö 0,2 baarin paineessa on  $\Delta H = 2358$  kJ/kg [16, s 904] ja höyrystyslämpötila 60,8 °C [16, s. 904]. Mineraaliöljyn ominaislämpökapasiteetti on  $c_p = 1.8$  kJ/kg K [16, s. 904]. Koska alipainereaktoriin ei tuoda ylimääräistä energiaa, esilämmitetty öljy luovuttaa veden höyrystämiseen tarvittavan energian kaavan (12) mukaan [16, s. 177] :

$$dE = m c_p \Delta T \quad (12)$$

Veden höyrystämiseksi vaadittu energia on kaavan (13) mukaan [16, s. 61]:

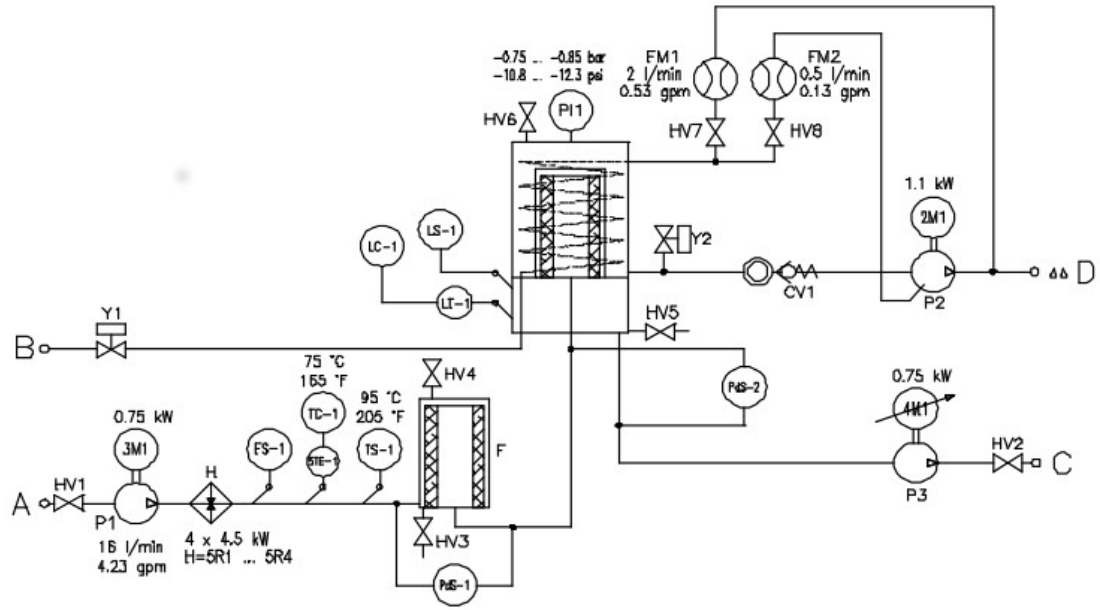
$$E_h = \Delta H m \quad (13)$$

Ratkaistaan kaavasta (13) massa, jolloin saadaan kaava (14):

$$m = \frac{E_h}{\Delta H} \quad (14)$$

Yhden kilogramman öljyä luovuttama energia on teoriassa siis kaavan (12) mukaan  $1.8 \cdot 10^7 = 27 \text{ kJ}$ . Öljyn luovuttamalla energialla voidaan höyrystää kaavan (14) mukainen määrä vettä 11,4 g.

Massaprosentteina siis suurin mahdollinen poistettava vesimäärä on n. 1% eli 10 000 ppm vettä öljyn seassa, todelliseen saantoon vaikuttaa vielä esilämmittimen todellinen kyky nostaa jatkuvasti tuloöljyn lämpötila asetusarvoon sekä reaktorin todellinen höyrystämisteho.



A: Dirty oil inlet

B: Cooling water inlet

C: Clean oil outlet

D: Water drain

P1: Feed pump

P2: Vacuum pump

P3: Discharge pump

H: Pre heater

F: Pre filter

FM1: Cooling water control

FM2: Sealing water control

Kuva 19. Facor 960 alipainehöyrystimen toimintakaavio.

Esilämmittimen lämmönnostokyvyn laskemiseksi korvataan massa  $m$  kaavassa (12) massavirralla:

$$\dot{m} = \frac{Q \rho}{60} \quad (15)$$

jossa  $Q$  on syöttöpumpun tilavuusvirta [l/min]

$\rho$  on öljyn tiheys [kg/l]

Saadaan yhtälö:

$$P = \frac{Q \rho}{60} c_p \Delta T \quad (16)$$



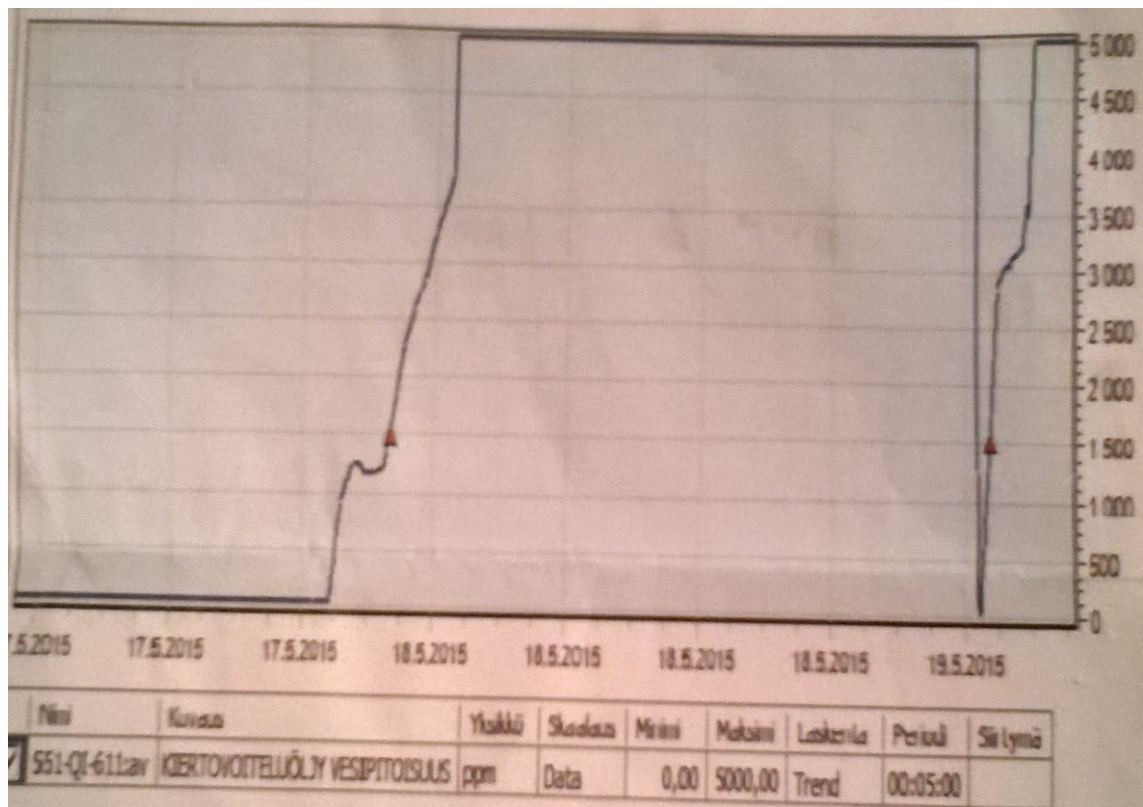
Esilämmittimen (H Kuva 19) kokonaisteho on 18 kW, jonka pitäisi riittää nostaman tuloöljyn lämpötilaa 16 l/min virtauksella kaavan (16) mukaan  $\Delta T = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Järjestelmä todettiin toimivaksi kierrättämällä 1 m<sup>3</sup> säiliössä 2,4 massaprosenttia vettä sisältävää kiertovoiteluöljyä n. 24 tuntia. Testin jälkeen öljyn vesipitoisuus Karl Fischer titrauksen mukaan oli 60 ppm.

### 3.3.2 CASE kiertovoitelujärjestelmä

Kuivatuskoneen kiertovoitelujärjestelmän vapaan veden pitoisuutta painesuodattimen ja lämmönvaihtimen jälkeen mitataan Kytola Oilan online-mittarilla. Mittausjärjestelyä oli tarkastelu noin vuosi aiemmin [5], jolloin mittarin kalibroinnin tarpeesta oli epävarmuutta, koska mittarin näyttämä oli pysynyt jo vuosia samana ja konsernin toisella tehtaalla oli kokemuksia mittareiden jatkuvasta kalibroinnin tarpeesta.

Tarkastelujakson aikana kiertovoitelujärjestelmässä tapahtui haveri ja mittauksen vesipitoisuus lähti nousuun (Kuva 20).



Kuva 20. Tuloste prosessinhallintajärjestelmästä, Kytola Oilan vesipitoisuusmittauksen tulos ajan funktiona.

Koska vesipitoisuus kasvoi erittäin nopeasti ja juuri ennen haveria levylämmönvaihtimen vesipuolelle oli puhallettu liitännästä paineilmaa tukkeutumisen aiheuttaman lämpötilanousun vuoksi, epäiltiin syyksi lämmönvaihtimen vuotoa, vaikka teoriassa lämmönvaihtimessa öljyn paineen tulisi olla suurempi kuin vesipaineen. Ero on kuitenkin pieni suhteessa painehäviöön lämmönvaihtimen yli. Lisäksi haverin vuoksi kone pysäytettiin, jolloin kiertovoitelujärjestelmän paine laskee ja mahdollistaa veden pääsyn öljyn sekaan.

Korjaustoimenpiteenä lämmönvaihdin korvattiin uudella ja ryhdyttiin toimenpiteisiin veden poistamiseksi öljystä luvussa 3.3.1 mainitulla alipainehöyrystimellä. Kiertovoitelusäiliön täyttötilavuus on noin 10 m<sup>3</sup> ja pian kävi selväksi että öljyn vesipitoisuus on liian suuri (Karl-Fischer titrauksen mukaan n. 24 000 ppm), jotta vesipitoisuutta saataisiin laskettua järkevässä ajassa. Myös alipainehöyrystimen esilämmitysteho osoittautui riittämättömäksi, kun öljyn lämpötila oli 20°C. Vettä alkoi poistua vasta kun öljyä siirrettiin 1 m<sup>3</sup> konttiin, jossa öljy pysyi riittävän lämpimänä. Havainto tukee kohdassa 3.3.1 kaavalla 8 laskettua tulosta, jonka mukaan esilämmittimen teholla lämpötilaa voi maksimissaan nostaa 46°C.

Koska aikaa oli rajallisesti, koko säiliö imettiin imuautolla tyhjäksi ja korvattiin uudella öljyllä. Pian käynnistyksen jälkeen kuitenkin vesipitoisuus alkoi hälyttää uudel-



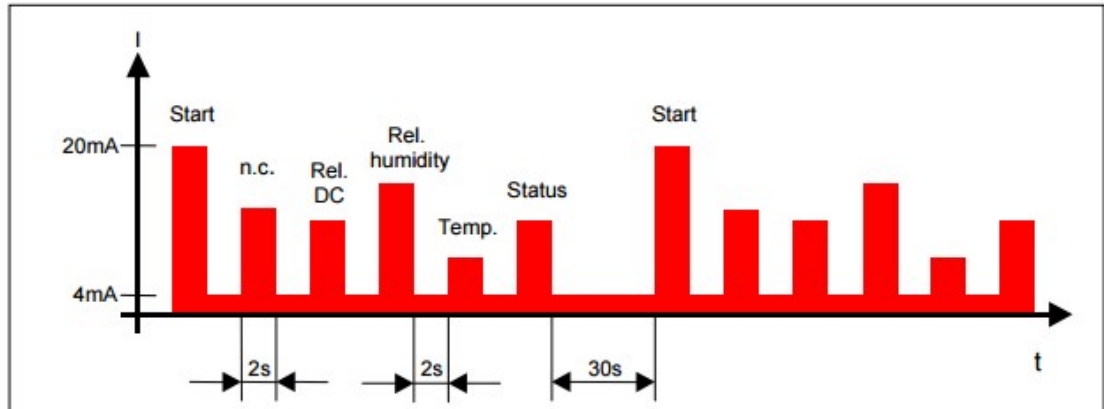
leen, jonka seurauksena kone pysäytettiin ja kiertovoitelujärjestelmä tyhjennettiin. Erään paluuöljyputken vesitystä avattaessa havaittiin venttiilistä tulevan höyryä koh-  
tuullisen voimakkaalla paineella. Tutkittaessa kuivaussynteriryhmää havaittiin kolmen  
laakeripesän liikkuneen niin, että pesä oli tiukasti höyrylinjan läpiviennin laippaa vas-  
ten. Laakeripesien epäiltiin liikkuneen päänvientinarujen katkettua ja kietouduttua sylin-  
terien akselikauloille tiukasti ja näin keventäen sylinterin päätä sallien kelluvan laakeri-  
pesän liikkeen. Yksi laakeripesiä vasten painautuneista höyrylaipoista sattui vuotamaan,  
aiheuttaen paineessa olevan höyryn pääsyn laakeripesän sisään ja sitä kautta kiertovoite-  
luöljyyn. Vuotoa ei havaittu ensimmäisen tyhjennyksen yhteydessä koska päähöyry-  
venttiili oli suljettu ja höyrynpaine järjestelmässä oli laskenut ennen öljyn tyhjennystä.

Tapaus oli erittäin epätodennäköinen, eikä sitä oltaisi huomattu ilman vesipitoi-  
suusmittausta.

### 3.4 Öljyn kunnonvalvonta anturi – Hydac HLB1400

Kokeiltiin myös online-mittauksiin tarkoitettua öljyn kunnonvalvonta-anturia. Tarkoi-  
tuksena oli hankkia anturi, jolla voitaisiin kontrolloida pullonäytteiden vesipitoisuutta  
kohdassa 3.3 esitetyllä tavalla. Hydac-anturi oli suhteellisen kosteuden mittaamiseen  
tarkoitetuista antureista halvin ja sähkönjohtavuuden ja dielektrisyysvakion mittaussmah-  
dollisuutta pidettiin hyvänä lisänä. Anturi on mahdollista liittää myös HMG3000 -data-  
loggeriin, jolloin olisi mahdollisuus tehdä mittauksia myös kentällä, joka myöhemmin  
osoittautui epäkäytännölliseksi, koska anturi vaatii erillisen 12V virtalähteen.

Mittaamiseen käytettiin Labjack u3 -dataloggeria, jolle on saatavilla Python -ajuri.  
Pythonin avulla dataa voidaan käsitellä kätevästi Numpy-matriisilaskentakirjastolla ja  
piirtää kuvaajia matplotlib-kirjaston [26] avulla. Anturin Pin4 eli signal 2 -ulostulo lä-  
hettää 4-20 mA virtaviestin avulla anturin lukemat eräänlaisella sarjaliikennesekvenssil-  
lä eli 2 sekuntia 4-20 mA viesti, jonka jälkeen 2 sekuntia 4 mA, jonka jälkeen seuraava  
viesti 2 sekuntia 4-20 mA (Kuva 21) jne. Luettavat suureet on mahdollista asettaa  
HMG3000 avulla.



All signals output to the analogue output are 4..20 mA current-loop signals, sequenced and spaced as follows:

		Output signal	Duration
Start signal:		20 mA	2 s
		Pause (4 mA)	2 s
Signal 1:	n.c.	0% (12 mA)	2 s
		Pause (4 mA)	2 s
Signal 2:	relative change in dielectric constant	-30% ... +30%	2 s
		Pause (4 mA)	2 s
Signal 3:	relative humidity	0% ... +100%	2 s
		Pause (4 mA)	2 s
Signal 4:	temperature	-25°C... +100°C	2 s
		Pause (4 mA)	2 s
Signal 5:	status signal	See table below for levels	2 s
Pause before next output cycle:		4 mA	30 s

Kuva 21. Hydac HLB1400 anturin ”sarjaliikenneprotokolla”.

Anturia kokeiltiin eri öljyillä sekä lisäämällä 500 millilitraan Neste 32 Super -hydrauliöljyä asteittain vettä (Tulokset Liitteessä D), kunnes vesi aiheutti selkeästi öljyn kanssa emulsion (Kuva 22).



*Kuva 22. Hydac kunnonvalvonta-anturi on asennettu tiiviisti näytteenottopurkin kanteen. Mitattavaan öljyyn on lisätty vettä, kunnes öljy on muuttunut emulsioksi.*

Anturin näyttämä kyllä nousi, mutta lopussa lisätty vesimäärä oli niin suuri, että saturaatiopisteen olisi pitänyt ylittyä. Anturi ei reagoinut lisättyyn veteen toivotulla tavalla tai ainakaan riittävän johdonmukaisesti, jotta anturia olisi järkevää käyttää vesipitoisuuden valvontaan kohdassa 3.3 esitetyllä tavalla. Myös dielektisyysvakio- ja sähkönjohtavuusmittaus näyttivät lähes kaikille näytteille samoja lukemia, vaikka erityisesti vaihteistoöljyn ja hydraulioöljyn dielektrisyysvakiossa [18] ja sähkönjohtavuudessa [19] tulisi olla huomattavia eroja.

Pykäri [6, s. 46] on tutkinut diplomityössään vastaavaa anturia online-käytössä. Tutkimuksessa suhteellisen kosteuden mittaus todettiin on-line -käytössä toimivaksi. Pullonäytteen mittaaminen asettaa mittaukselle on-line mittauksia suuremmat haasteet, koska eri öljyjen kyky sitoa vettä vaihtelee [14, s. 4]. Vesipitoisuuden mittausta tulisi edelleen tutkia eri antureilla, jotta saavutetaan riittävän johdonmukaiset mittaustulokset vesipitoisuusmittauksissa pullonäytteille, jotta vesipitoisuus voidaan mitata helposti kaikista käsiteltävistä näytteistä.

### 3.5 Öljyn viskositeetti

Öljyn viskositeetti on tärkeä osa voitelua ja viskositeetin mittaamisella pyrittiin seuraamaan öljyn vanhenemisen kehittymistä niin, että öljynvaihdotarpeen arviointi olisi mahdollista useita kuukausia ennen huoltoseisakkia. Viskositeetin mittaus on mahdollista Pall pcm400 -analysaattorilla, mutta kohdassa 3.1.2 mainittujen tukkeutumisongelmien vuoksi käytännön mittausrutiinit ovat työläitä. Analysaattorilla myös lämpötilan hallinta on ongelmallinen. Viskositeetti tulisi pystyä mittaamaan sopivissa lämpötilaeroissa, jotta voidaan selvittää viskositeetin lämpötilariippuvuus ja verrata sitä uuteen öljyyn. Uuden öljyn parametrit ovat saatavilla valmistajalta, mutta jos halutaan välttyä laitteiden

tarkalta kalibroinnilta, voidaan sama mittaus suorittaa uudella vastaavalla öljyllä ja verrata mittaustulosta siihen.

Kun mittaukset on tehty kahdessa eri lämpötilassa, voidaan öljyn lämpötilariippuvuus esittää Waltherin kaavalla (17) [20, s. 2]:

$$\log_{10}(\log_{10}(v+0.7))=A-B*\log_{10}(T) \quad (17)$$

Yhtälö kirjoitetaan molemmille mitatuille lämpötiloille erikseen ja ratkaistaan niistä vakiot A ja B:

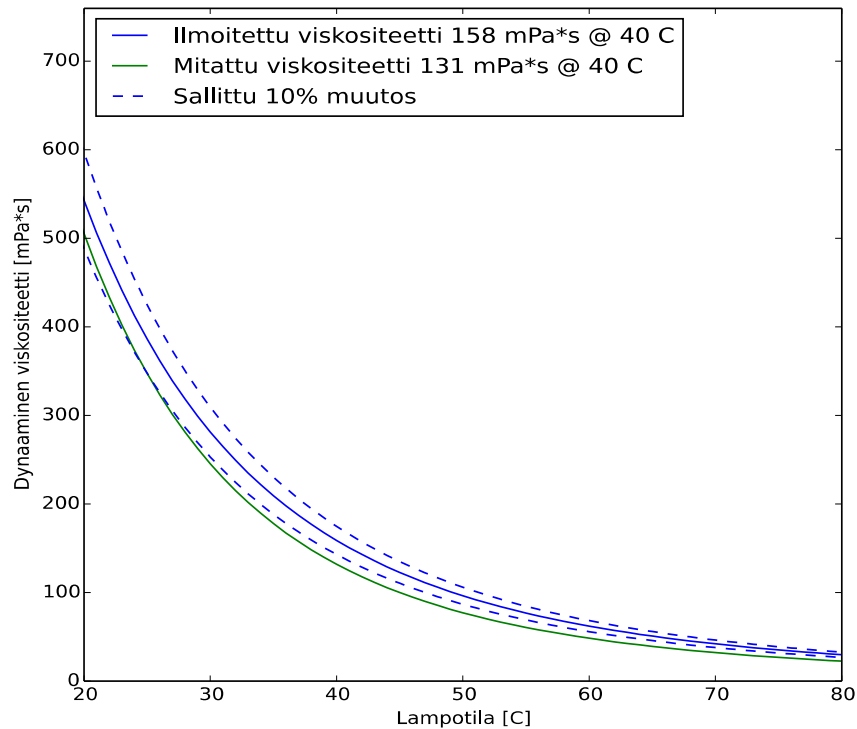
$$A=\log_{10}(\log_{10}(v_2+0.7))+B*\log_{10}(T_2+273.15) \quad (18)$$

$$B=\frac{(\log_{10}(\log_{10}(v_2+0.7))-\log_{10}(\log_{10}(v_1+0.7)))}{(\log_{10}(T_1+273.15)-\log_{10}(T_2+273.15))} \quad (19)$$

Kun vakiot on laskettu, voidaan molemmille mittaustuloksille laskea arvo missä tahansa lämpötilassa T kaavalla (20):

$$v=10^{\left(10^{(A-B*\log_{10}(T+273.15))}\right)}-0.7 \quad (20)$$

Mittaustulosten käsittelyn helpottamiseksi kirjoitettiin Python-scripti (liite E), joka lukee mittaustulokset excel-työkirjasta (esimerkki liitteessä E) ja piirtää lasketut viskositeetti-arvot lämpötilan funktiona (Kuva 23).



Kuva 23. Neste vaihteisto 150 EP mitattuna kahdella eri spindelillä.

Laskentamenetelmä saattaa vaikuttaa monimutkaiselta, mutta se on mahdollista automatisoida täysin, kuten liitteessä E on kuvattu. Mikäli näytteitä halutaan vertailla ilman laskentaa, lämpötilaa tulisi pystyä kontrolloimaan hyvin tarkasti, koska  $\pm 0.1$  asteen muutos 40 asteen lämpötilassa aiheuttaa n. 1% muutoksen viskositeetin mittaustulokseen.

### 3.5.1 Viskositeetin mittaus Brookefield-viskometrillä

Vaihteistoöljynäytteiden viskositeetti mitattiin Brookefield-viskometrillä. Isaac Newtonin määritelmä viskositeetista on seuraava [21, s. 15]: Kaksi samankokoista, pinta-alaltaan A, ja toistensa kanssa samansuuntaista fluidi ”levyä”, joiden etäisyys on dx, liikkuu samaan suuntaan eri nopeuksilla, joiden ero on dv. Newtonin mukaan nopeuseron ylläpitämiseksi tarvittava voima F on suoraan verrannollinen nopeuseroon dv kaikilla dx arvoilla:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (21)$$

$\eta$  on väliaineen materiaaliveko, jota kutsutaan dynaamiseksi viskositeetiksi.

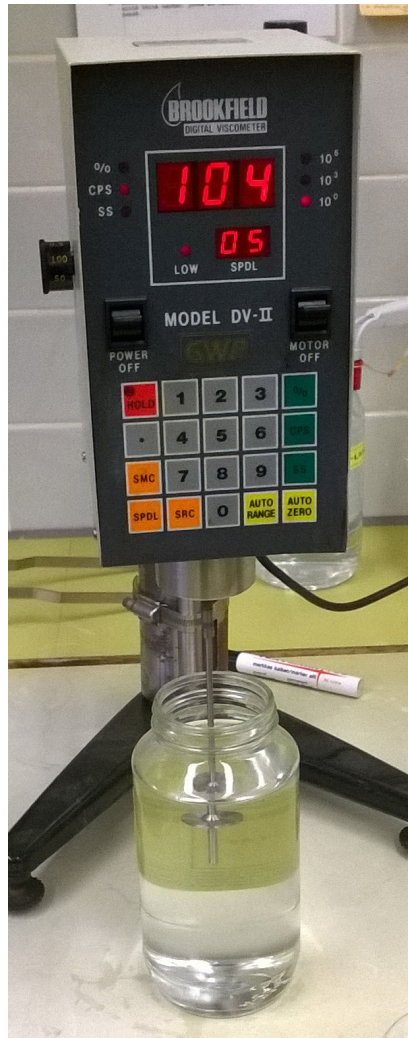
Termistä  $\frac{F}{A}$  käytetään myös nimitystä leikkausvoima  $\tau$  ja termiä  $\frac{dv}{dx}$  nimitetään nopeusgradientiksi  $\dot{\gamma}$ . Siirtämällä vakio viskositeetti yhtälön toiselle puolelle, ja nimeämällä kaavan 21 termit uudestaan saadaan viskositeetin kaavaksi (22):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (22)$$

Brookefield-viskometrin spindelien geometria on valittu sopivasti niin, että vääntömomentti voidaan ilmoittaa suhteessa moottorin maksimivääntömomenttiin  $M$  [%] ja nopeusgradientti kierrosta/minuutti. Yhtälö on vielä kerrottava spindelivakiolla  $C$ , jolloin saadaan tulos mPa\*s:

$$\eta = C * \left( \frac{M}{rpm} \right) \quad (23)$$

Viskometrin periaate on, että sähkömoottori pyörittää ”spindeliä” eli karaa näytteessä ja moottorin vaatima vääntömomentti mitataan ja ilmoitetaan LCD-näytöllä (Kuva 24).



*Kuva 24. Brookefield viskometri ja tarkastettu viskositeettinäyte. Viskositeetin arvo näytöllä on 104 mPas.*

Viskometri tarkistettiin mittaamalla sertifioituja viskositeettinäytteitä (Kuva 24) eri karoilla ja pyörintänopeuksilla taulukon 1 mukaisesti. Käytettiin kahta eri näytettä, toisen viskositeetti on tarkastettu 100 mPas ja toinen 5000 mPas lämpötilassa 25°C.

*Taulukko 1. Tarkastettujen viskositeettinäytteiden mittaustuloksia eri spindeleillä ja pyörimisnopeuksilla.*

Pyörintänopeus [RPM]	Momentti-lukema [%Max]	Kara-kerroin	Viskositeetti mPa*s
10	53.3	1000	5330
5	26.7	1000	5340
2.5	13.4	1000	5360
5	12.7	2000	5080
10	25.5	2000	5100
20	51.1	2000	5110
10	12.7	4000	5080
20	25.7	4000	5140
50	64.2	4000	5136
20	10.1	10000	5050
50	25.5	10000	5100
100	50.8	10000	5080
1	12.2	400	4880
2.5	31	400	4960
5	62.1	400	4968
100	35.1	400	140.4
50	13.7	400	109.6
100	12.9	1000	129

Taulukosta 1 havaitaan, että viskositeettimittauksen tulos vaihtelee huomattavasti käytetyn spindelin ja leikkausnopeuden mukaan (Kuva 23, s. 34). Tulosten perusteella epäiltiin viskometrissä olevan mekaanista tai sähköistä vikaa. Tarkastettujen viskositeettinäytteiden avulla olisi mahdollista laskea tuloksille korjauskertoimia, mutta tarkoituksenmukaisemmaksi menetelmäksi arveltiin mittaamista vakiokaralla ja pyörintänopeudella hammasvaihteesta otettu öljynäyte sekä vertailunäytteeksi vastaavaa uutta öljyä. Mittaustuloksia on esitetty liitteessä E.

Mittauksissa havaittiin viskositeetin kohoavan öljyn käyttöiän myötä, mutta erot ovat vaihtelevia ja standardin ISO 3104 määrittelemän 10 % muutoksen alkuperäiseen huomaama myös aistinvaraisesti öljyn tummentuneesta väristä ja alentuneesta läpikuultavuudesta sekä makeahkosta palaneen tuoksusta. Joittenkin näytteiden viskositeetti oli muuttunut vähemmän kuin standardin määrittelemän 10%, mutta suodatettaessa membranikalvon läpi, saattoi kalvo värjäytyä huomattavasti (Kuva 10, s. 20) tai partikkelimäärä olla muuten huomattavasti kohonnut.

Viskositeetin määrityksestä voisi olla hyötyä kohteissa joissa käytetään viskositeettindeksiin vaikuttavia lisäaineita. Mittaamalla viskositeetti eri lämpötiloissa ja vertaamalla tulosta referenssiin, voidaan päätellä ovatko öljyn ominaisuudet edelleen riittävät takaamaan voitelun myös alhaisissa lämpötiloissa. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että tutkimuksessa ympäristössä ulkoiset tekijät kuten vesi ja hiukkaset pilaavat öljyn ennen normaalin käyttöiän saavuttamista.



## 4 HYDRAULIIKKAVENTTIILIEN TESTAUS

Tehtaalla on käytössä hydraulikkaventtiilien testaukseen sopiva koneikko. Koneikkoon haluttiin laitteisto, jolla voidaan testata myös proportionaaliventtiileitä. Ominaisuus päätettiin toteuttaa PWM-tekniikalla. Ohjaus ja mittauslaitteeksi valittiin Labjack u3 -data-loggeri, jossa on 4 kpl 0-10V AIN -analogisia mittauspisteitä, sekä ohjelmoitavia FIO -portteja, joiden ominaisuuksiin kuuluu myös 3.3V PWM-signaalin tuottaminen. Signaali kytketään suoraan L298N -transistorin enable-pinniin. Transistoriin syötetään virta Bosch 27V tasavirtalähteestä.

Koneikossa on valmiina paineanturit painelinjalle, toimilaitelinoille A ja B sekä virtausmittaus painelinjalle. Kytkettiin anturit uudelleen niin, että mittauksien maajohdin on kytketty sarjaan Labjackin AIN-liitäntöihin ja maahan 480 ohmin resistorin kautta. Kytkentäkaavio löytyy liitteestä H. Yksinkertaisilla kytkennöillä voidaan solenoidin läpi kulkevaa virtaa ohjata tarkasti Python-scriptillä, joka on esitetty liitteessä 8. Sensorien mittaukset saadaan tallennettua ja piirrettyä matplotlib-kirjaston [27] avulla.

Tavalliset proportionaali-suuntaventtiilit voidaan kytkennällä testata helposti, tarkemmat ohjeet liitteessä F ja tuloksia liitteessä G. Käytössä on myös integroidulla elektronikalla varustettuja proportionaaliventtiileitä, joiden testaamiseksi on tehtävä lisäkytkentöjä. Eniten proportionaalitekniikkaa on tehtaalla käytössä paineenalennusventtiileissä. Monet paineenalennusventtiilit ovat kuitenkin hydraulisesti esiohjattuja, joten testauspenkkiin tarvittaisiin tätä varten säädettävä hydraulinen Y-kanava. Käytössä oleva hydraulikkaventtiilivalikoima on hyvin kirjava ja yleispätevän testausrutiinin luominen on lähes mahdotonta. Testaussuunnitelma on tehtävä jokaiselle järjestelmälle erikseen tarpeen mukaan. Erityisesti proportionaaliventtiileitä pidetään varastossa hyvin vähän, joten vian sattuessa on vaikea määrittää, minkälaista vastetta venttiililtä odotetaan.

## 5 PAINEMITTAUKSET

Tehtaalla on käytössä Hydac HMG3000 kannettava dataloggeri hydrauliiikan painemittauksia varten. Painemittauksia tehdään yleensä vikatilanteessa, etsittäessä vikaantumisen syytä. Yleinen ongelma on kuitenkin paine-referenssitietojen puute, jolloin ei varsinaisesti tiedetä mitä mittaukselta odotetaan, vaan mittaus toimii ainoastaan päättelyn tukena. Referenssimittauksia tulisi kerätä järjestelmien normaalista toiminnasta ja tallentaa ne tietokantaan. Tätä varten on saatavilla valmis ohjelma HMGWIN-3000, jonka avulla dataloggerista voidaan ladata, nimetä ja tallentaa mittauksia.

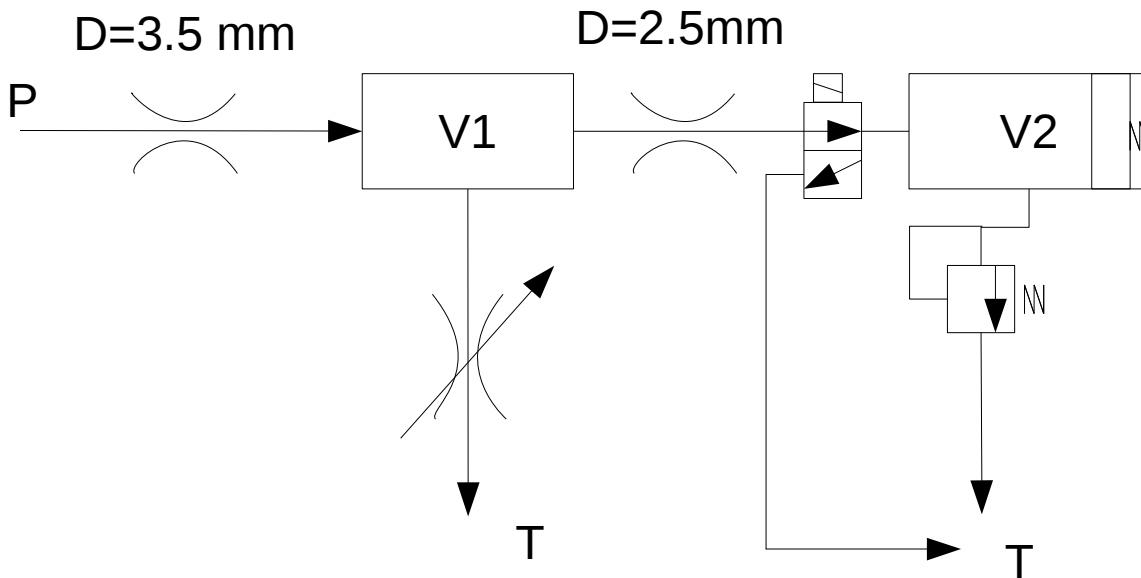
Toinen vaihtoehto on liittää painemittaukset suoraan prosessinhallintajärjestelmään MetsoDNA, jolloin mittauksien trendit tallentuvat automaattisesti järjestelmään. Näin luonnollisesti onkin laitteiden kohdalla, joissa hydrauliiikan paine on prosessiparametri. Koska prosessidataa tallennetaan hyvin pitkältä ajanjaksolta, on mittauksen resoluutiota pakko pienentää arvoon 0,2-1 näytettä/sekunti. Hydrauliiikan vianetsinnässä ja kunnonvalvonnassa painemittauksien näytteenottotaajuuden tulisi olla yli 100 näytettä/sekunti, jotta nopeat painevaihtelut saadaan näkyviin.

### 5.1 Turbiinigeneraattorin pikasulkulohkon mittaukset

Ongelmana oli höyryturbiinin pikasulkulohkon paineen aleneminen väliottojen hydraulikäyttöisten takaiskuventtiilien toimiessa. Lohkon syöttöpaine on säädetty 10,3 baariin ja paineen laskiessa alle 6,5 baariin pikasulkulohko toimii ja turbiini ajaa itsensä alas. Takaiskuventtiileitä voidaan avata ja sulkea suuntaventtiilillä osana turbiinin normaalia käyttöä kuormitustason muuttuessa, joten jatkuvat alasajot heikentävät käytettävyyttä huomattavasti.

Turbiinin pikasulkulohko on varsin monimutkainen, koska se sisältää paljon toimintoja alasajon toteuttamiseksi erilaisissa tilanteissa. Ongelmat olivat alkaneet lohkon oltua huollossa, joten kulumisesta tai vikaantumisesta johtuvat syyt suljettiin pois. Myös pumppu suljettiin mahdollisten syiden ulkopuolelle, koska painelinjan paine pysyi takaiskun toimiessa tasaisena.

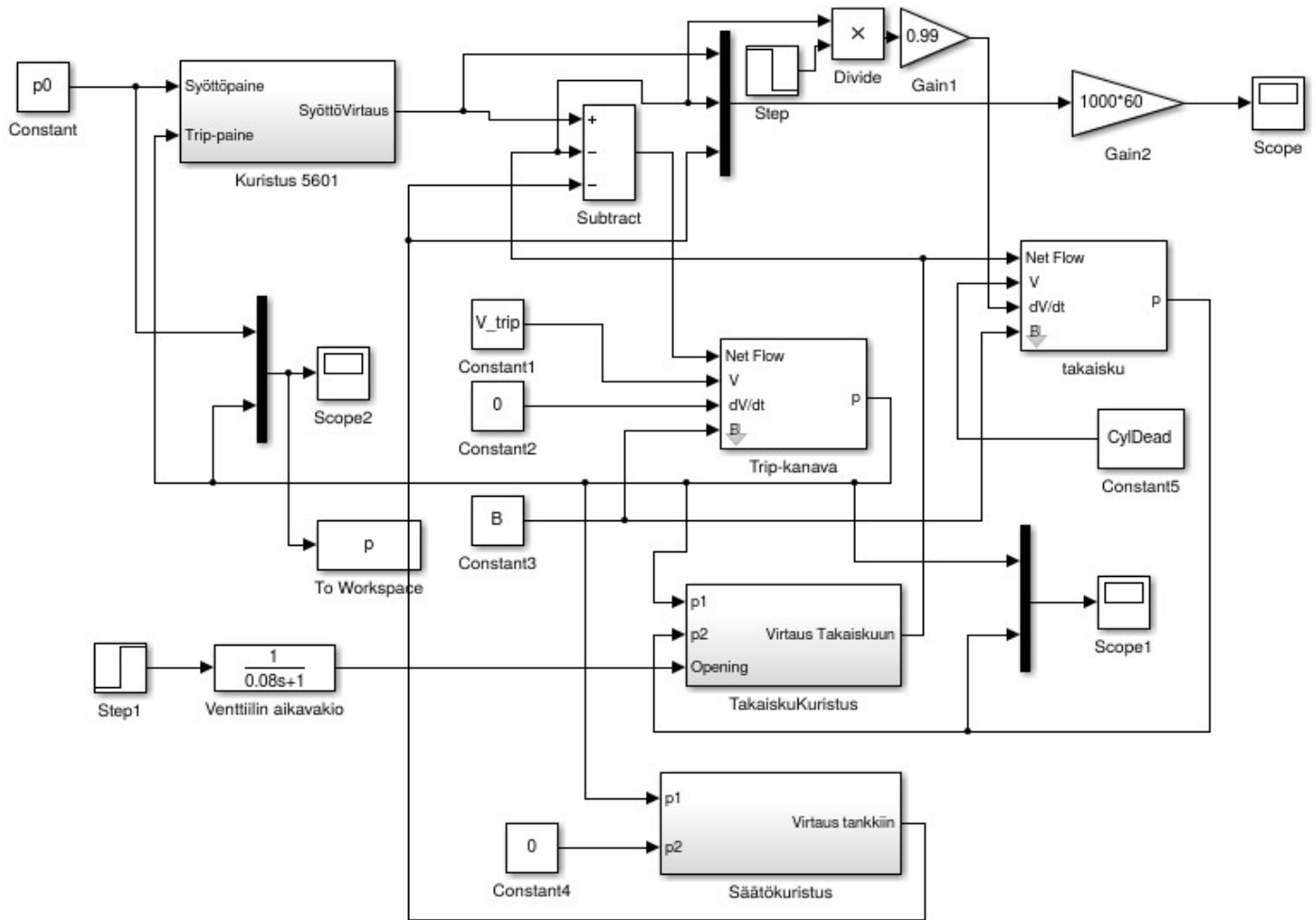
Epäily kohdistui pikasulkukanavan ja tankkilinjan välissä olevaan säädettävään kuristukseen, jonka tehtävä on sallia pieni huuhteluvirtaus muuten staattisesti paineessa olevassa kanavassa. Yksinkertaistettu kaavio on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Yksinkertaistettu hydraulikaavio pikasulkulohkon ongelmakohdasta.

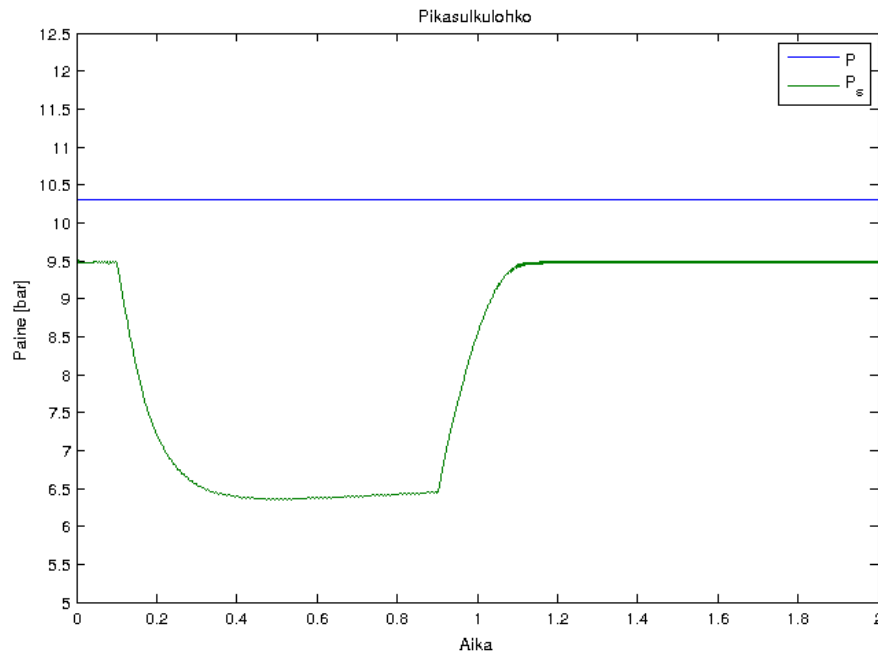
Kuvassa 25 V1 on pikasulkukanava, joka pysyy jatkuvasti staattisessa paineessa. Mikäli jokin monista pikasulkuehdoista täyttyy, painelinjasta kanavaan V1 virtauksen salliva venttiili sulkeutuu ja venttiili kanavasta V1 tankkilinjaan aukeaa jolloin kanavan paine laskee nopeasti ja vapauttaa jousikuormitteisen toimilaitteen V2, jolloin höyrylinjan takaiskuventtiili sulkeutuu.

Yksinkertaistetun hydraulikaavion pohjalta tehtiin Matlab Simulinkillä simulointimalli (Kuva 26), jonka avulla haluttiin tutkia pikasulkukanavan V1 paineen käyttäytymistä suuntaventtiilin avautuessa.



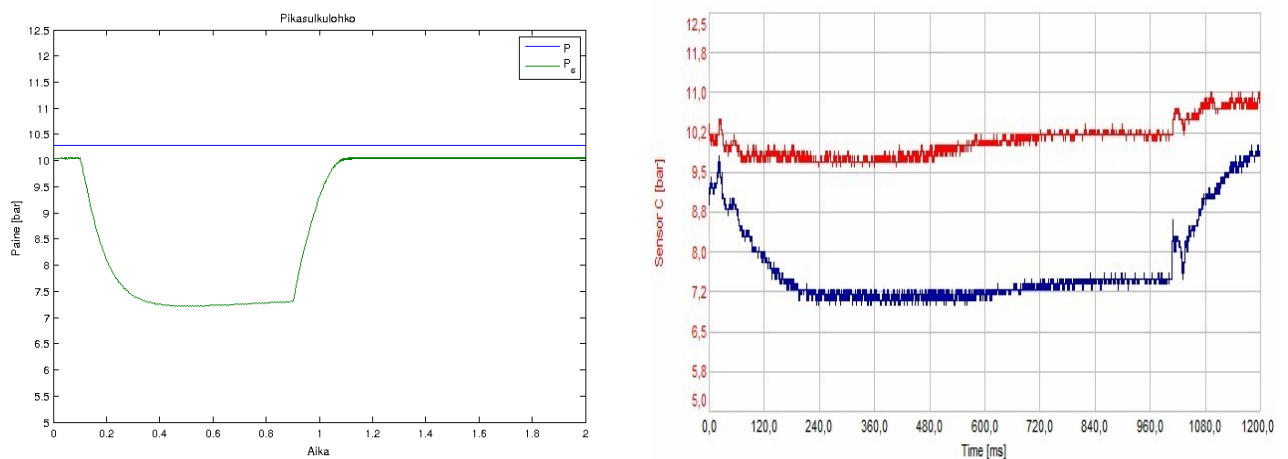
Kuva 26. Yksinkertaistetusta hydraulikaaviosta tehty simulointimalli.

Normaalitilanteessa pikasulkukanavassa mitattiin paine 9,5 bar. Suuntaventtiilin avautumishetkellä toimilaitteen V2 kuollut öljytilavuus on tankin paineessa. Toimilaitteen kuolleen tilavuuden arvioitiin olevan suuri pikasulkulohkon tilavuuteen nähden, jolloin toimilaitteen kuolleen tilavuuden paineistuminen aiheuttaisi pikasulkulohkossa paineen pudotuksen. Valmistajalta saatiin tieto yhden toimilaitteen kuolleeksi tilavuudeksi 7,1 litraa, pikasulkukanavan tilavuudeksi arvioitiin noin 1 litra. Kuristuksen  $D=3,5$  mm yli mitattiin normaalissa staattisessa tilanteessa paine-ero 0,8 baaria. Etsimällä simulointimallin avulla tällainen tilanne muuttamalla säädettävän kuristuksen arvoa, mitattua paine-eroa vastaavaksi säätökuristuksen halkaisijaksi ratkaistiin 1,9 mm (Kuva 27).



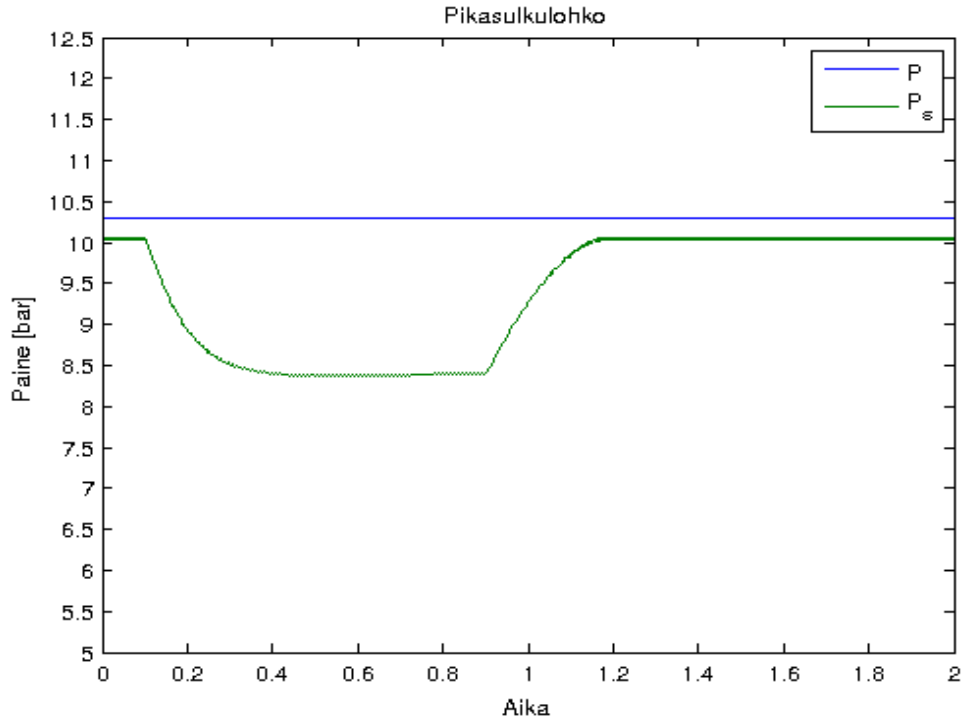
Kuva 27. Simuloidut painelinja (sininen) ja pikasulkulohko (vihreä) paineet.

Säätökuristuksen halkaisijalla 1,9 mm simulointimallin mukaan pikasulkulohkon paine laskee suuntaventtiilin avautuessa hyvin lähelle 6,5 baaria, joka aiheuttaa turbiinin pikasulun. Tämä tukee havaintoa, että pikasulkua ei tapahtunut joka kerta toimilaitteen toimiessa. Tuloksen perusteella säätökuristinta kiristettiin n. 1/8 kierros, jolloin normaalitytilanteessa paine ero kuristuksen  $D=3,5$  mm yli oli noin 0,3 baaria. Simulointimallin mukaan paine-ero vastaa säätökuristuksen halkaisijaa 1,4 mm. Dataloggeri jätettiin mittaamaan paineita kuristuksen  $D=3,5$  mm yli, niin että paineen laskiessa alle 9,5 baarin tulokset tallennetaan muistiin. Mittauksesta saatiin myöhemmin tulos (Kuva 29), joka vastasi hyvin simulointimallia halkaisijalla 1,4 mm, jolloin paine putosi alimmillaan 7,2 baariin (kuva 28) :



Kuva 28 ja 29. Painelinjan ja pikasulkulohkon simuloidut ja mitatut paineet.

Myöhemmin myös kuristus  $D=2,5$  mm vaihdettiin  $D=2,0$ , jolloin paineenpudotus simuloinnin mukaan edelleen pienenee 8,5 baariin (Kuva 30):



Kuva 30. Pikasulkulohkon (vihreä) ja painelinjan (sininen) simuloidut paineet vakio-kuristuksen pienentämisen  $2.5 \rightarrow 2.0$  mm jälkeen.

Vikatilanteen mallintaminen analyyttisesti vei paljon aikaa. Jos pikasulkuhydrauliikan paineiden käyttäytymisestä normaalitilanteessa olisi ollut olemassa dokumentoidut mittaustiedot, vastaavaan tulokseen olisi päästy huomattavasti nopeammin.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Crosbyn mukaan [2] laadun mittaamisen sijaan tulisi keskittyä kehittämään tuotantoprosessia niin, että mittaamisesta tulee tarpeetonta. Tavoitteeseen pääsemiseksi on kuitenkin oltava riittävät välineet tiedon keräämiseksi, jotta kunnossapitoa voidaan kehittää tiedon ja ymmärryksen pohjalta. Kestoikäongelmien ratkaiseminen jatkuvalla mittaamisella ja kunnossapitotyöllä ei pitkällä aikavälillä laske kunnossapitokustannuksia vaan nostaa niitä.

Tässä työssä esiteltiin työkaluja kunnossapitotiedon hankkimiseksi. Partikkelianalyysiä tulisi käyttää voideltavien kohteiden puhtaustavoitteiden määrittämiseen, optimointiin ja kontrollointiin. Partikkelilaskentaa olisi vielä mahdollista jatkokehittää analysoimaan myös partikkelien muoto ja väri.

Vesipitoisuusmittausten tulisi johtaa toimenpiteisiin hydraulikka- ja voitelujärjestelmissä veden pääsyn estämiseksi öljyn joukkoon. Kuitenkin joissain tapauksissa, kuten kuvatussa kiertovoitelujärjestelmässä, tapahtumaa on lähes mahdoton ennakoida. Kriittisissä kohteissa tulisikin olla jatkuva vesipitoisuuden mittaaminen.

Viskositeetin mittaaminen ei välttämättä tuo lisäarvoa, mikäli näyte arvioidaan aistinvaraisesti. Viskositeettimittauksista voi olla hyötyä, jos pyritään tarkasti määrittämään voiteluaineen optimaalinen käyttöikä tietylle kohteelle.

Venttiilien testaus ei toimi yksin, vaan sen on oltava osa kunnossapitostrategiaa, joka määrittelee henkilöstöresurssit ja erityisesti käytössä olevan tiedon kulloinkin kohteena olevan järjestelmän vaatimuksista.

Painemittauksista saatiin erittäin suuri hyöty suhteessa vaadittuun investointiin. Ellei järjestelmistä ole olemassa riittävän kattavaa dokumentaatiota analyysiä varten, olisi vähintään dokumentoitava järjestelmien paineet häiriöttömässä tilanteessa kaikista käytävissä olevista mittapisteistä. Datan kerääminen on aina tietenkin työvoimaintensiivistä.

Venttiilitestaukselle ja painemittauksille pätee sama pääsääntö: ”Ennen testauksen aloittamista olisi tiedettävä minkälaista mittaustulosta odotetaan ja mitä asialle tehdään elleivät tulokset täsmää odotuksiin”.

Mittalaitteiden kustannukset dokumentoiduilla menetelmillä olivat minimaaliset, näin on mahdollista kokeilla menetelmiä käytännössä sitoutumatta jatkuvaan mittaukseen investoinneilla. Demingin ja Crosbyn oppeja noudatettaessa mittalaitteiden pitäisi lopulta olla tarpeettomia. Mittaukset jotka päädytään ottamaan osaksi prosessia, kuten vesipitoisuusmittaukset, tulisi automatisoida mahdollisimman pitkälle, jotta mittauksen yksikkökustannus saadaan mahdollisimman pieneksi.

## LÄHTEET

- [1] Deming, Edwards W., Out of the Crisis, MIT Press, 1986.
- [2] Crosby, Philip B. The Eternally Successful Organization: The Art of Corporate Wellness. New York: Penguin Books, 1992.
- [3] Immonen, Aarno, Hydraulikomponenttien käyttöiän tarkastelu, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2007. 85 s.
- [4] Ruippo, Kari, Hydraulijärjestelmien kunnossapidon toimintasuunnitelma ja toteutus, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013
- [5] Aho, Anssi, Sellutehtaan kuivatuslinjan kunnonvalvonnan ja ennakoivan huollon kehittäminen, Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto 2014, 18 s.
- [6] Pykäri, Patrik, Öljyn kunnonvalvonnan toteutus tunnelityökoneissa, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011. 52 s.
- [8] Virtanen, Markus, Paineistetun hydraulijärjestelmän öljyn kunnossapito, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012, 118 s.
- [9] Nikkilä, Pekka, Mobilehydrauliikan puhtaustase ja sen simulointi, Väitöskirja, TTKK, 2001, 120 s.
- [10] Ihanamäki, Timo, Hydraulioöljyn kvalitatiivinen analyysi, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1995, 98 s.
- [11] Tornio Works käynnissäpidon toimintamalli, 31.5. KTAMK Käynnissäpitoseminaari, 2012, 24 s.
- [12] Harika, E., Hélène, M., Bouyer, J., Fillon, M., Lubrication with water contaminated oil: experiments on a tilting pad thrust bearing, 10 th EDF/Pprime Workshop, 2011, 10 s.
- [13] Fitch J., How Water Causes Bearing Failure, Machinery Lubrication July 2008



[14] Cantley, R.E., The Effect of Water in Lubricating Oil on Bearing Fatigue Life, ASLE Transactions Volume 20.3.244-248, 1977, 5 s.

[15] Leathe John, Water's effect on wind-turbine gearbox oil, Windpower engineering & development, 8.12.2014

[16] Çengel, Y.A., Boles, M.A., Thermodynamics An Engineering Approach 8th Ed , 2014, 1115 s.

[17] Roddick Thomas, Designing an Automated Linear Translation Stage, OpenLab-tools, 2013, 9 s.

[18] Carey, A.A., Hayzen , A.J., The Dielectric Constant and Oil Analysis , Practicing Oil Analysis September 2001

[19] Lindner Michael, Oil Condition Monitoring Using Electrical Conductivity , Machinery Lubrication June 2013

[20] Characterizing the viscosity–temperature dependence of lubricants by molecular simulation

[21] More solutions to sticky problems, Brookefield Engineering Laboratories, 2014. 55 s.

[22] Hunt T.M, Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids, Essex 1993

[23] Naval air engineering center , Wear particle atlas (Revised) , 23.6.1982. 182 s.

[24] Al-Osaimy A.S., Elhabib O.A., Ali W.Y., Inspecting Metallic Wear Particles Contaminating Lubricating Automotive Engine Oils , International journal of control, automation and systems Vol.2 No.3 October 2013. 8 s.

[25] Python Numpy, URL: <http://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/>, 18.10.2015

[26] Python Matplotlib, URL: <http://matplotlib.org/index.html>, 29.10.2015

[27] Python RPi.GPIO, URL: <https://pypi.python.org/pypi/Rpi.GPIO>, 15.2.2015

## LIITE A OHJEET MIKROSKOOPPINÄYTTEEN ANALYSOINTIIN

Tässä liitteessä on selostettu hydrauliiikka- tai voiteluöljynäytteen preparointi ja mittausmenetelmä näytteen hiukkaspitoisuuden määrittämiseksi. Hydrauliiöljynäyte tulisi ottaa mieluiten painelinjasta ennen suodatinta, jolloin näyte on hyvin sekoittunut ja edustaa kiertoon menevää öljyä mahdollisimman hyvin.

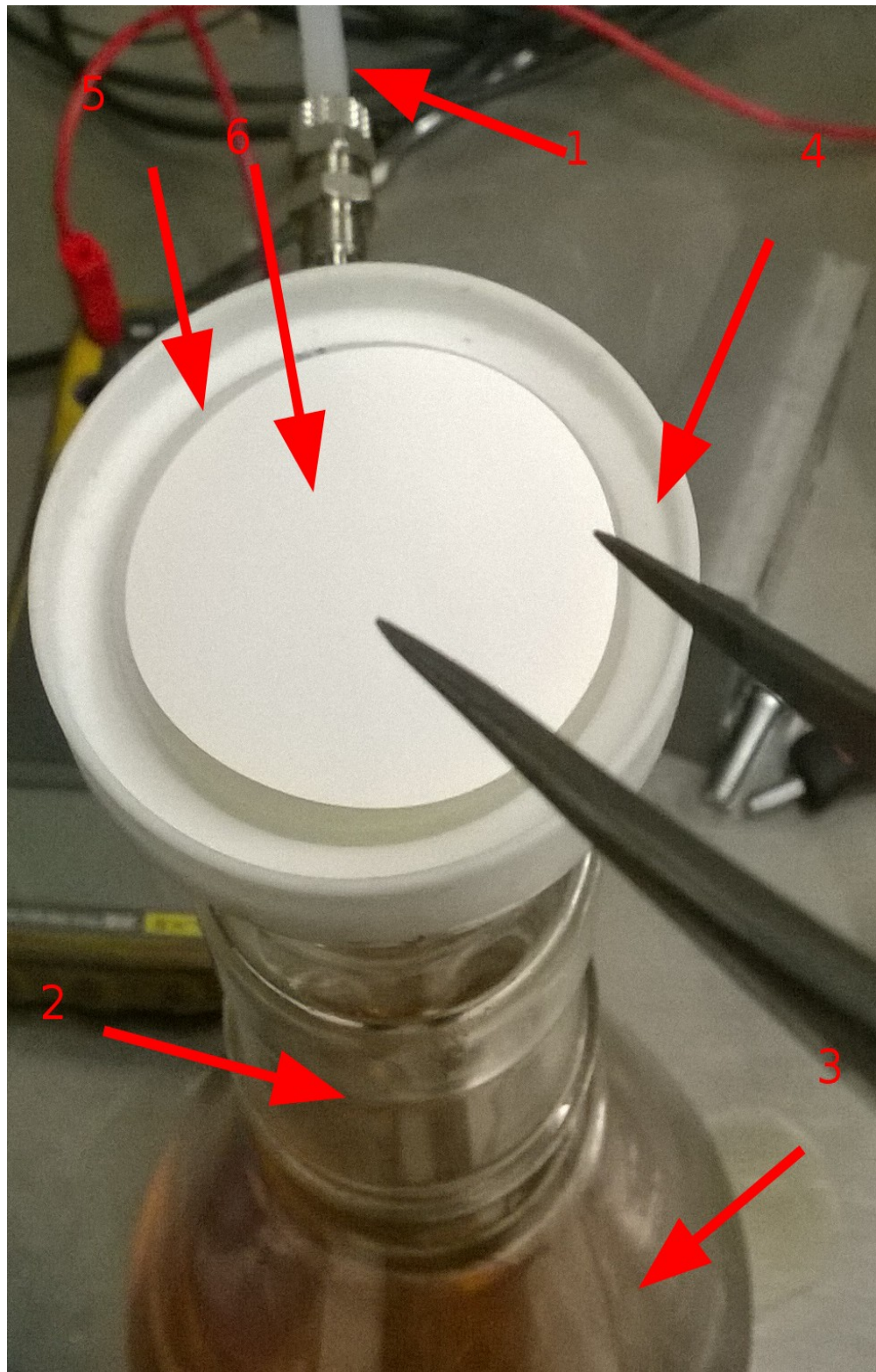


*Kuva A1. Jaa näyte kahteen 500 ml näytepurkkiin tai yhteen 1000 ml astiaan jos sellainen on.*

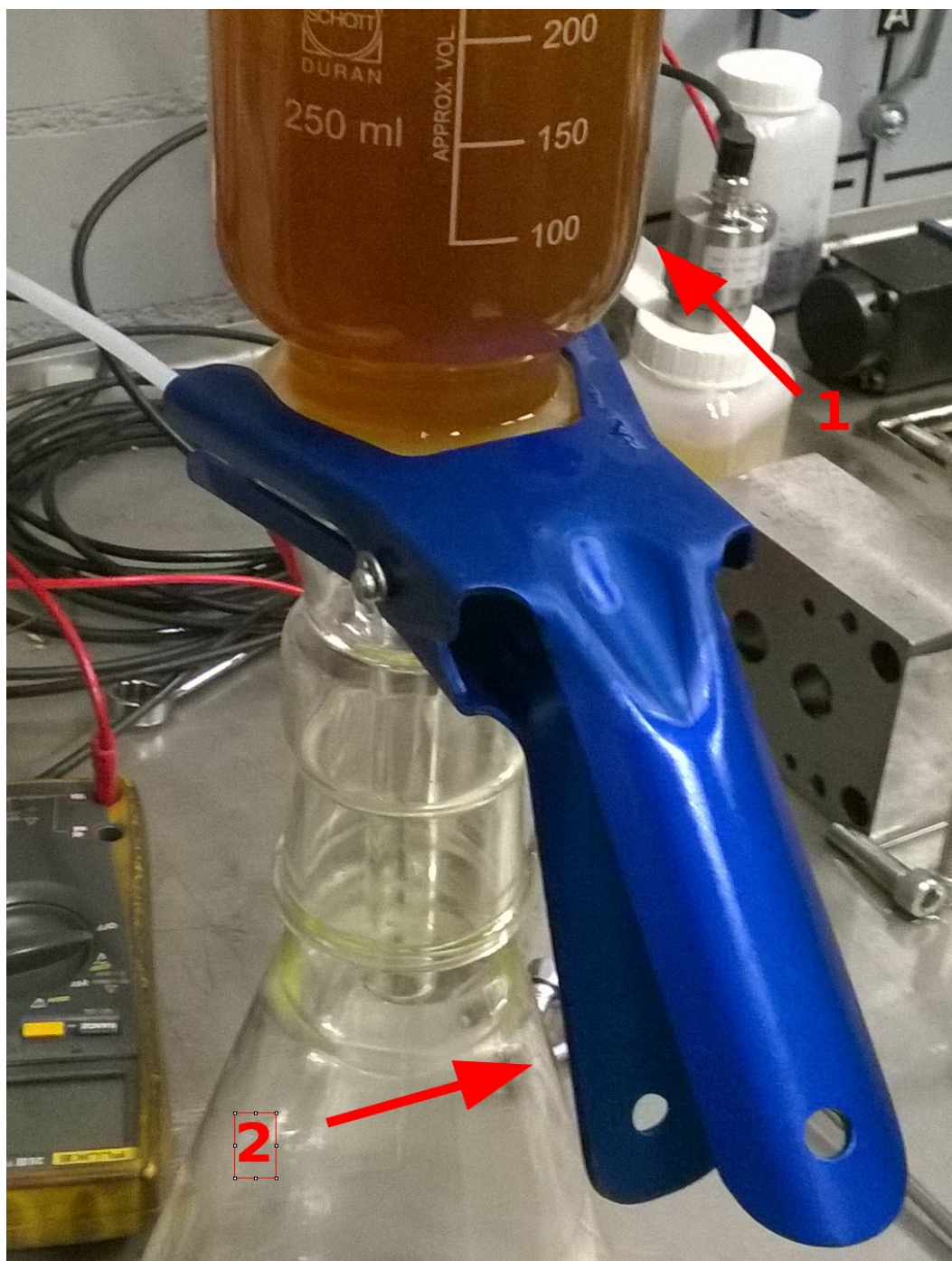


*Kuva A2. Täytä näytepurkit valopetroolilla, sulje kannet ja sekoita hyvin.*





*Kuva A3. Liitä alipainepumpun imuletku (1) väliosaan (2) ja väliosa pulloon (3). Laita muovinen väliholkki (4) väliosan päälle ja huokoinen aluslevy (5) väliholkin päälle. Aseta 47 mm selluloosanitraattimembraani (6) aluslevyn päälle.*

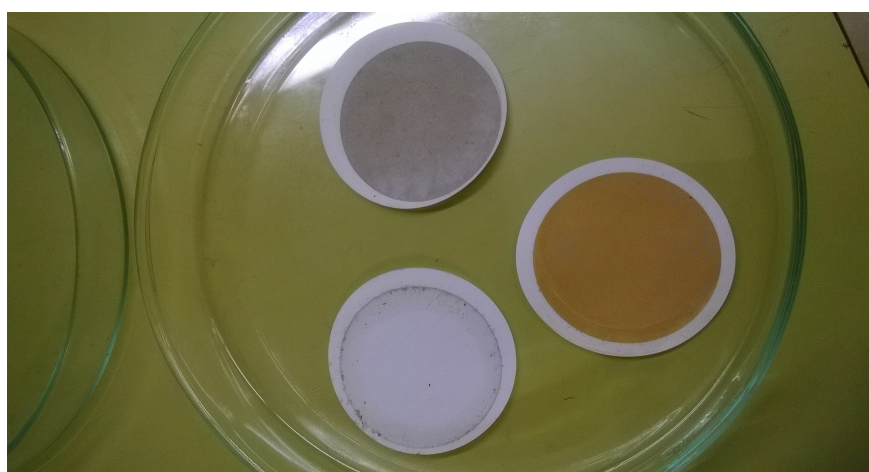


*Kuva A4. Laita mittalasi (1) väliholkin (4, Kuva 3) päälle ja liitä osat yhteen puristimella (2). Kaada 250 ml sekoitettua näytettä (Kuva 2) mittalasiin ja kytke virta alipainepumppuun (1, Kuva A5)*





*Kuva A5. Kun kaikki öljy-petroliseos on läpäissyt membrainin, kaada vielä n. 150 ml puhdasta valopetrolia mittalasiin, jotta ylimääräinen öljy poistuu ja membrainin väri on tasainen. Kun myös lisätty valopetroli on imeytynyt pulloon, sammuta alipainepumppu (1), poista puristin ja mittalasi aseta membrani pinseteillä kannelliseen petrimaljaan odottamaan lämpökäsittelyä (kuva 6).*



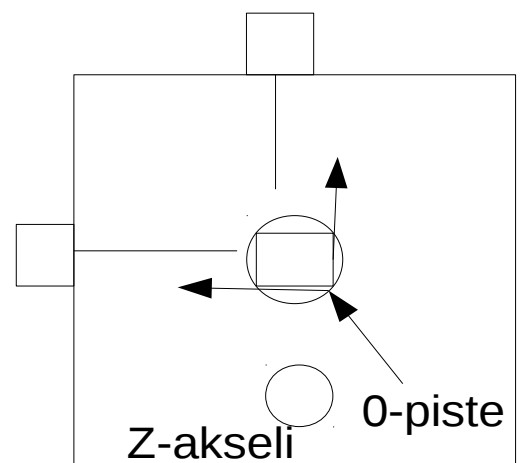
*Kuva A6. Kuljeta petrimaljaa kannella peitettynä. Laita näytteet lämpökaappiin yli 80 asteeseen 8 tunniksi tai kunnes membrainin reunat ovat muuttuneet läpikuultavista valkoisiksi*



*Kuva A7. Ota kuivunut membrani ja aseta se kahden mikroskooppi-aluslasin väliin.*

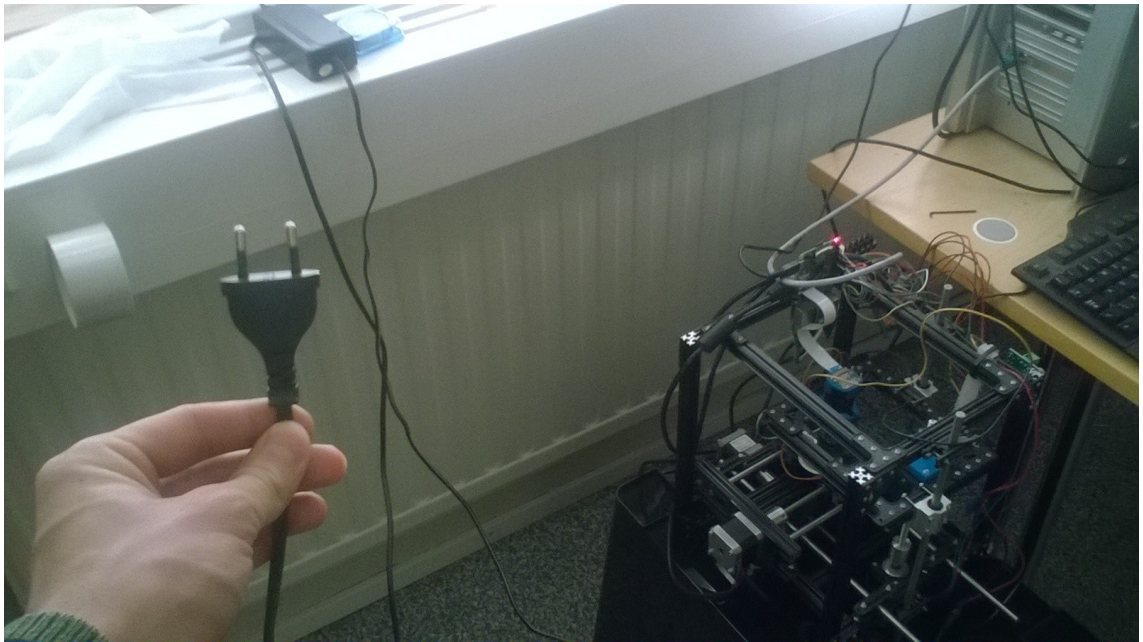


*Kuva A8. Aseta aluslasit kiinnikkeiden alle. Käytä apuna ruuvimeisseliä keventääksesi kiinnikkeiden puristusta.*

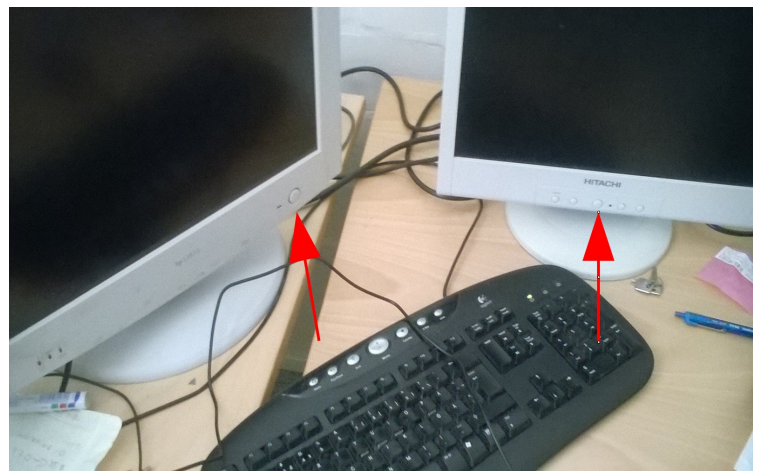


*Kuva A9. Pyri asettamaan membrani niin, että objektiivi on kuvan osoittamassa 0-pisteessä. Akselit liikkuvat automaattilla 0-pisteestä vasemmalle ja ylös ympyrän sisällä olevan neliön mukaan. Paikan voi vielä hienosäätää kohdalleen myöhemmin.*



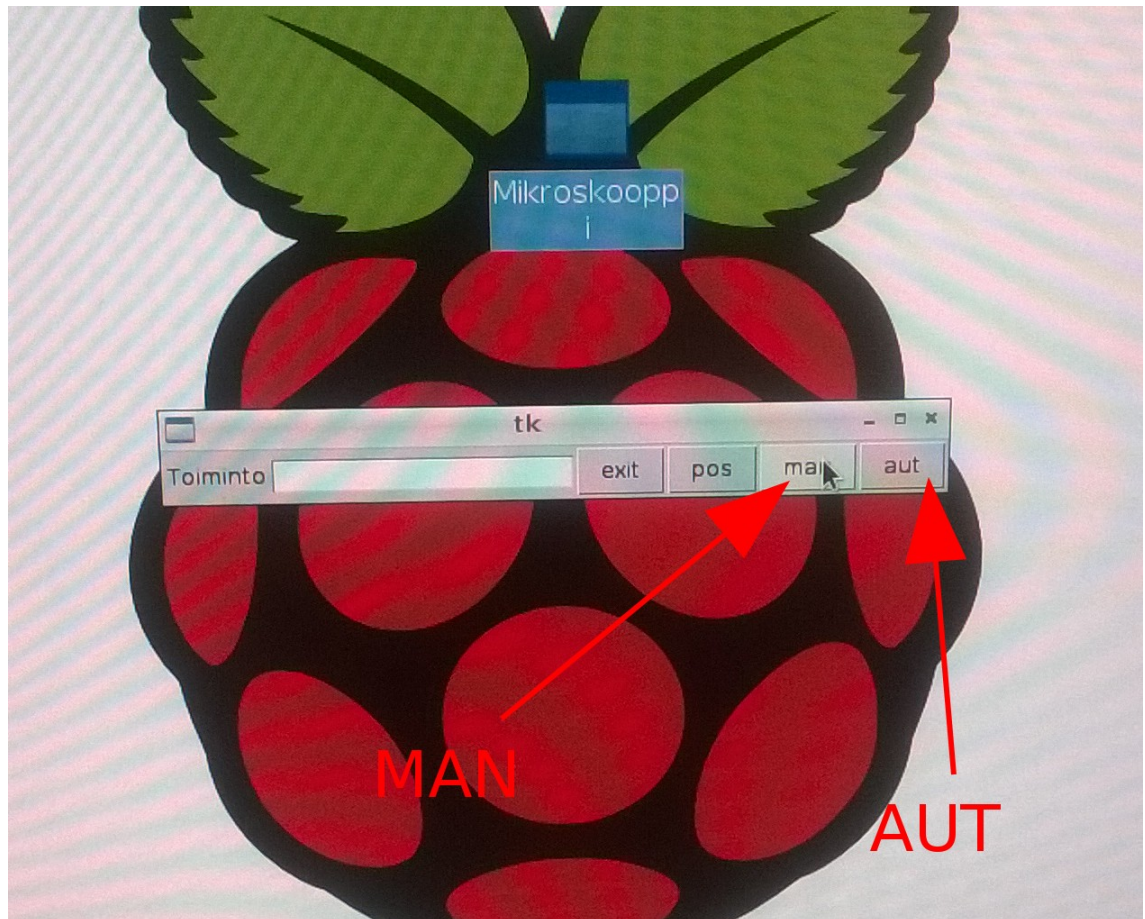


*Kuva A10. Kytke mikroskoopin valopistoke seinään.*

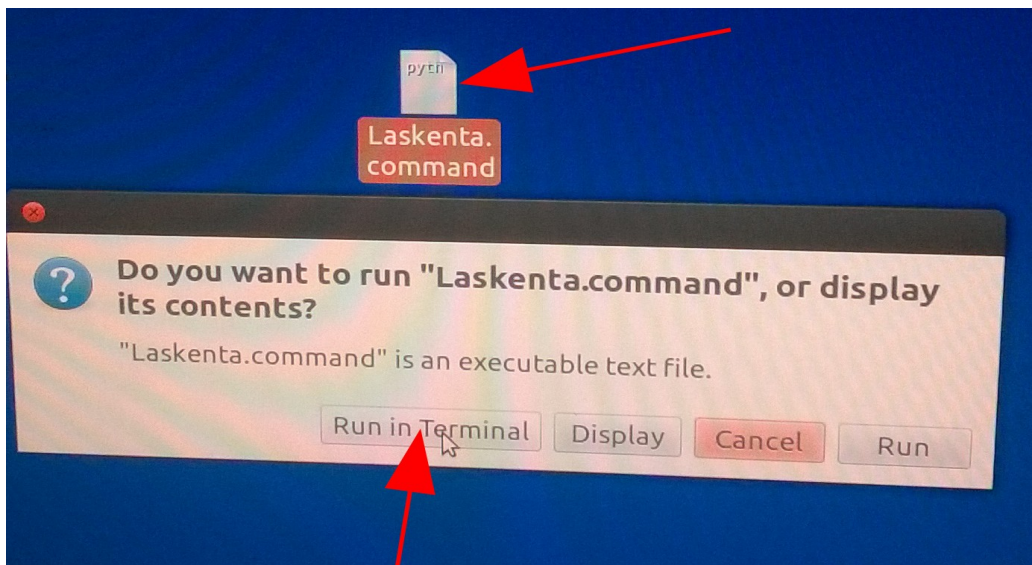


*Kuvat A11 ja A12. Käynnistä laskentatietokone ja molemmat näytöt*

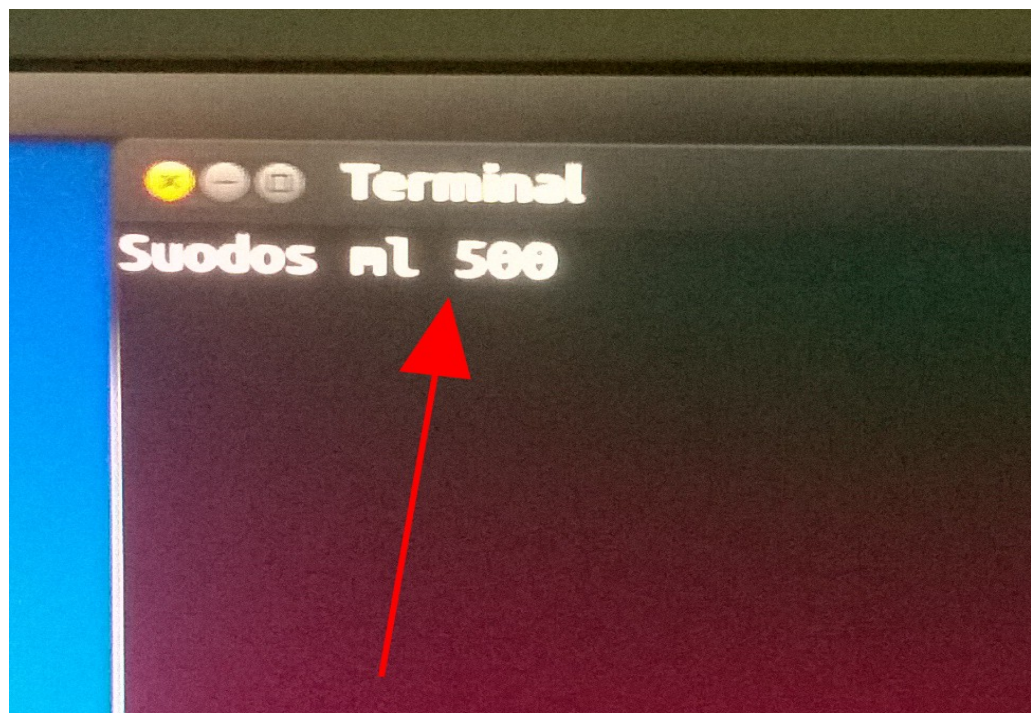




Kuva A13. Tuplaklikkaa mikroskoopin näytöllä olevaa kuvaketta "Mikroskooppi" ja valitse ensiksi "MAN", silloin avautuu näkymä mikroskoopin objektiivin läpi. Voit manuaalisesti nuolinäppäimillä siirtää laskennan aloituskohtaa. Säädä a ja z -näppäimillä objektiivia ylös tai alas niin, että kuva on tarkka. Huomaa, että caps-lock vaikuttaa komentoihin. Painamalla kerran s-näppäintä aktivoituu nopea tila, painamalla kerran d-näppäintä aktivoituu hidas tila. Kun kuva on säädetty tarkaksi, paina q-näppäintä päästäksesi takaisin aloitustilaan. Nyt voit klikata ruutua "AUT" jolloin automaattilaskenta alkaa.



Kuva A14. Valitse laskentatietokoneen työpöydältä *Laskenta.command* -niminen tiedosto ja tuplaklikkaa sitä. Valitse vaihtoehto "Run in Terminal".



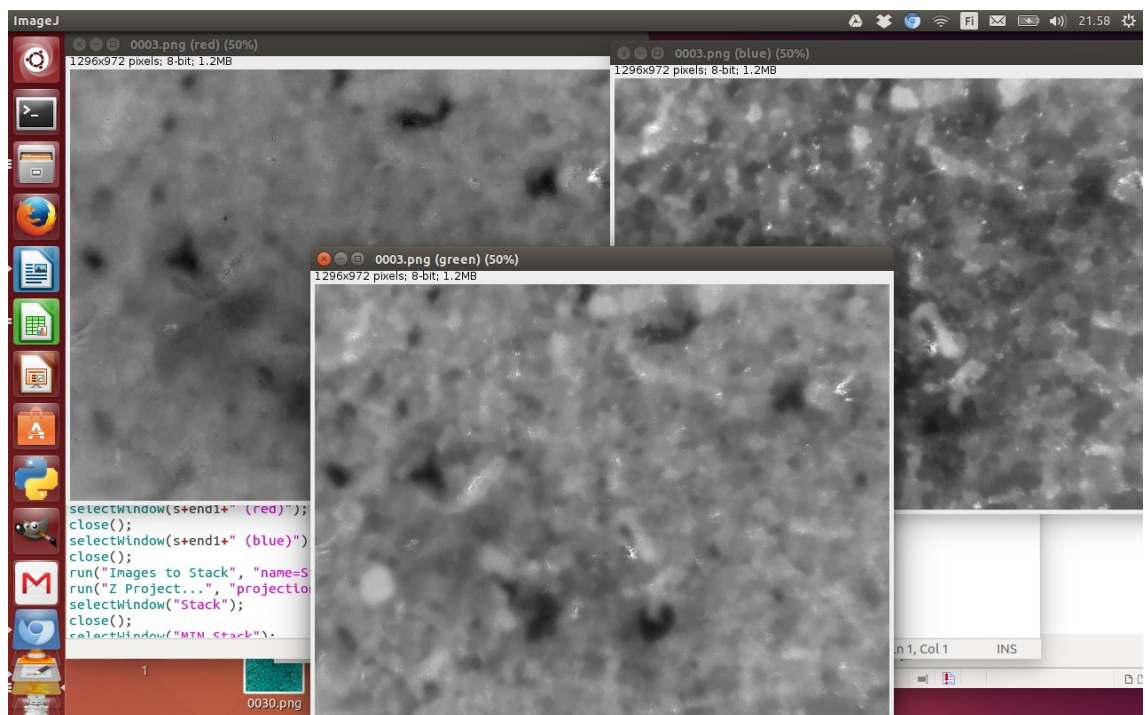
Kuva A15. Syötä avautuvaan komentorivi-ikkunaan kohdassa 4 suodattuneen öljyn määrä ja paina Enter. Laskenta alkaa ja kestää noin 4 tuntia jos otetaan 200 kuvaa. Laskennan jälkeen kuvat löytyvät laskentatietokoneen työpöydän kansioista "Analyysi" ja laskentaraportti sekä laskentakuvat alikansioista "Results".



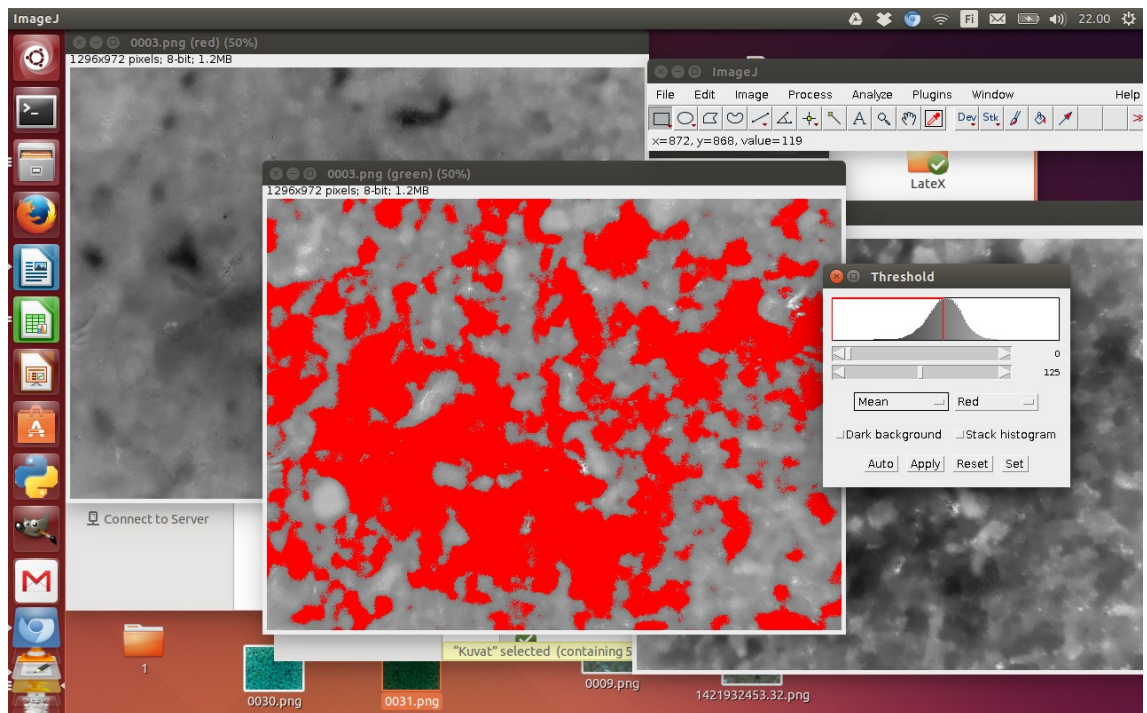
## LIITE B PARTIKKELILASKENTAMENETELMÄN DOKUMENTAATIO

Tässä liitteessä esitetään partikkelilaskennan periaate ja algoritmin eteneminen askel-askeleelta.

Mikroskoopin ottamat kuvat membraanista siirretään laskentatietokoneelle, jossa laskenta tapahtuu ImageJ makron avulla seuraavasti:



*Kuva B1. Otettu RGB-kuva jaetaan "Split Channels"-komennolla kanaviin.*



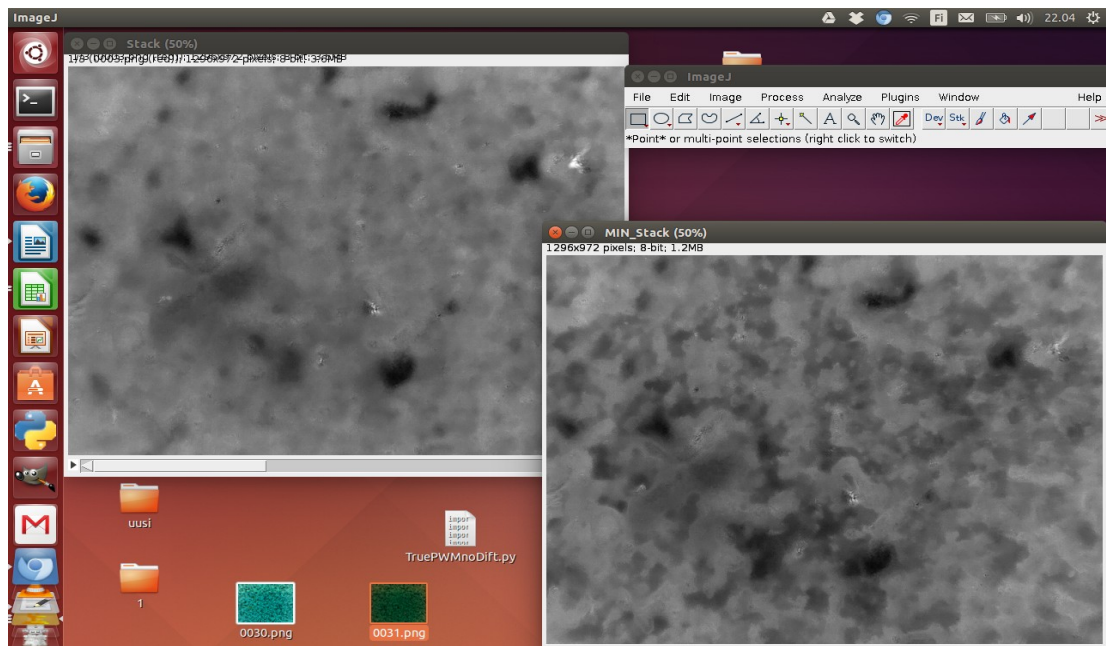
*Kuva B2. Vihreän kanavan histogrammin keskiarvo tallennetaan muuttujaan:*

*`setAutoThreshold("Mean");`*

*`getThreshold(lower,upper);`*

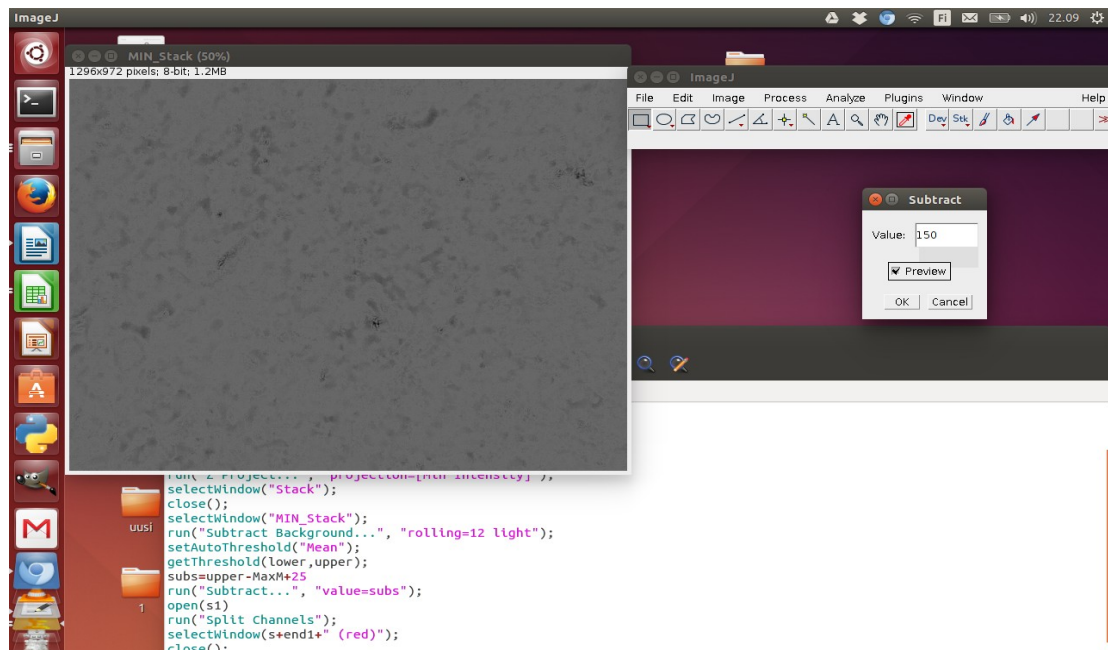
*`MaxM=upper;`*

*`resetThreshold();` // ja palautetaan alkuarvoon*

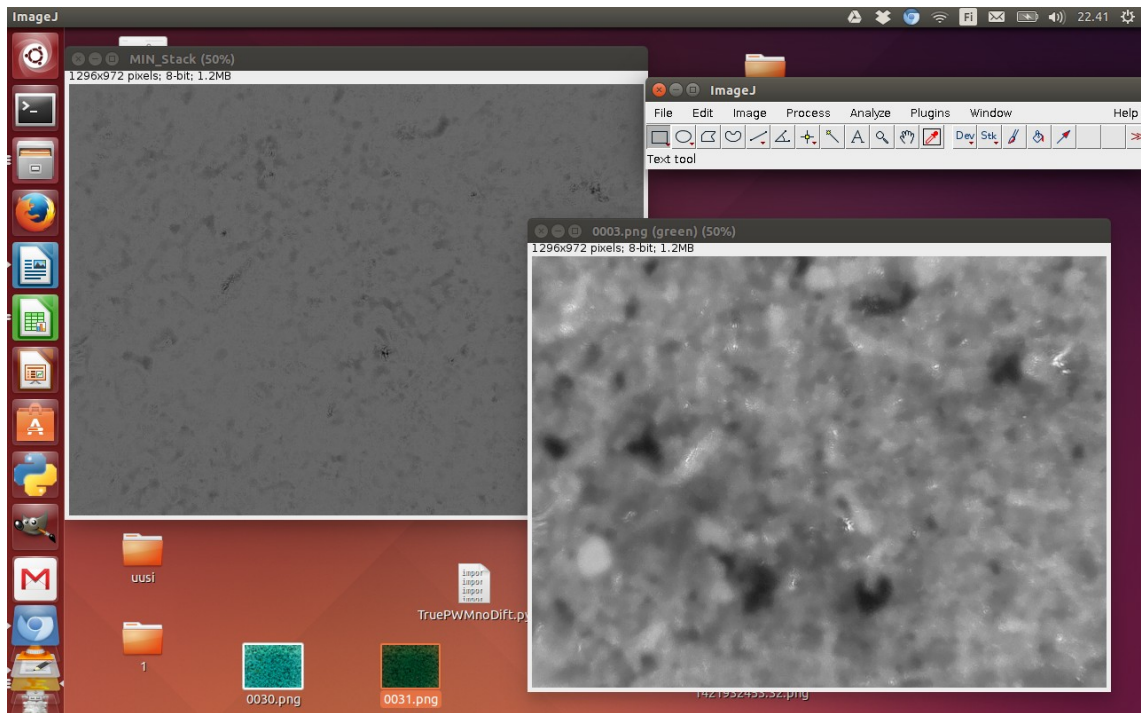


*Kuva B3. Kuvat kootaan "Stackkiin" ja Z-projektoidaan pienimmän intensiteetin mukaan yhdeksi kuvaksi:*

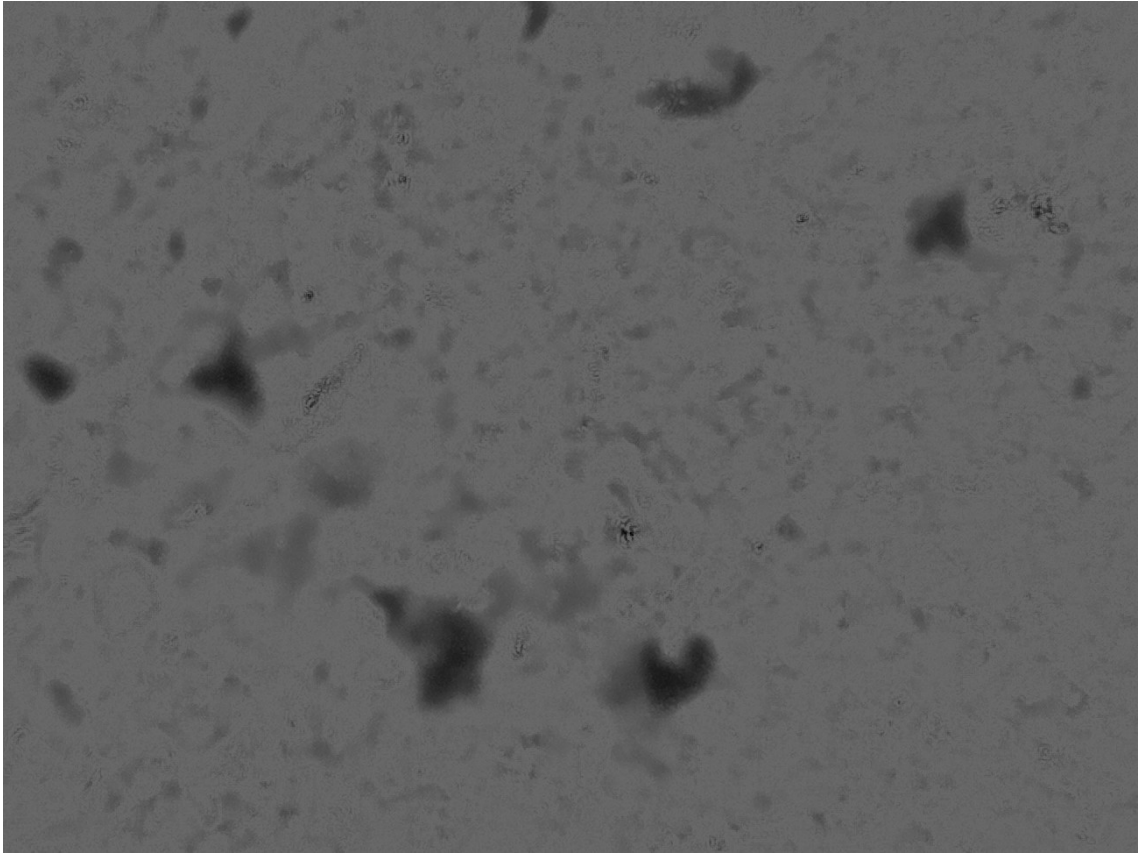
```
run("Images to Stack", "name=Stack title=[] use");
run("Z Project...", "projection=[Min Intensity]");
selectWindow("MIN_Stack");
```



*Kuva B4. Poistetaan tausta: run("Subtract Background...", "rolling=12 light");  
 setAutoThreshold("Mean"); // tarkastetaan histogrammin keskiarvo jälleen  
 getThreshold(lower, upper);  
 subs=upper-MaxM+25 //vähennetään taustapuhdistetun kuvan intensiteetti  
 run("Subtract...", "value=subs"); //arvosta vihreän kanavan keski-intensiteetti  
 // ja luku 25, joka on saatu kokeilemalla*

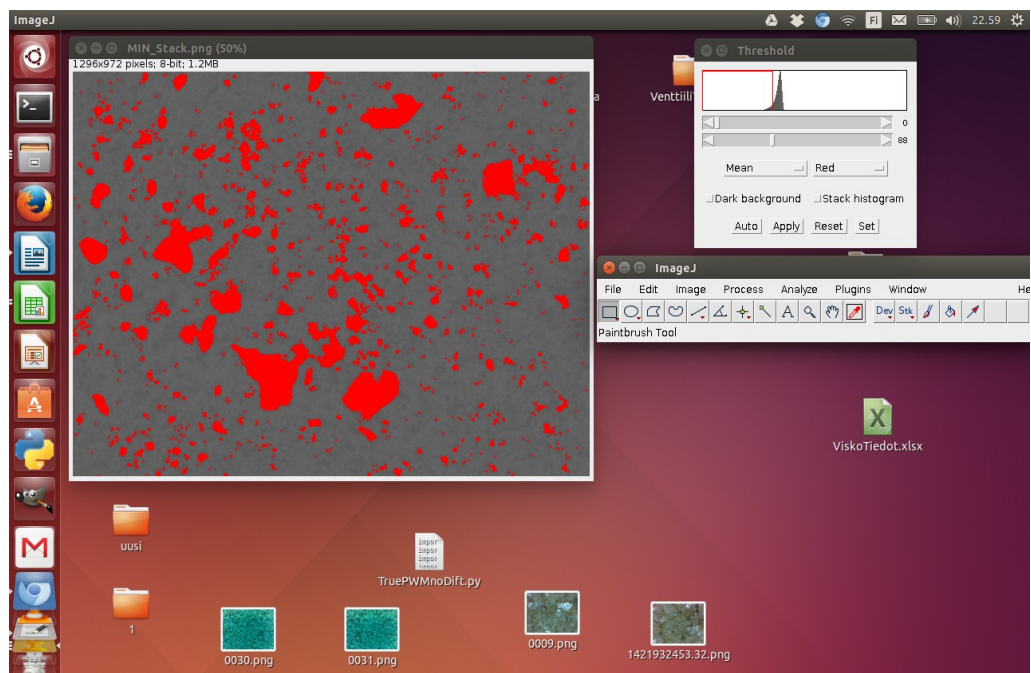


*Kuva B5. Suoritetaan tämän jälkeen kohta 1. uudestaan eli avataan kuva ja ”Splittataan” kanavat. Suljetaan kuitenkin sininen ja punainen ja säilytetään vihreä kanava. ”Stackataan” ja Z-projektoidaan kuvat pienimmän intensiteetin mukaan:*



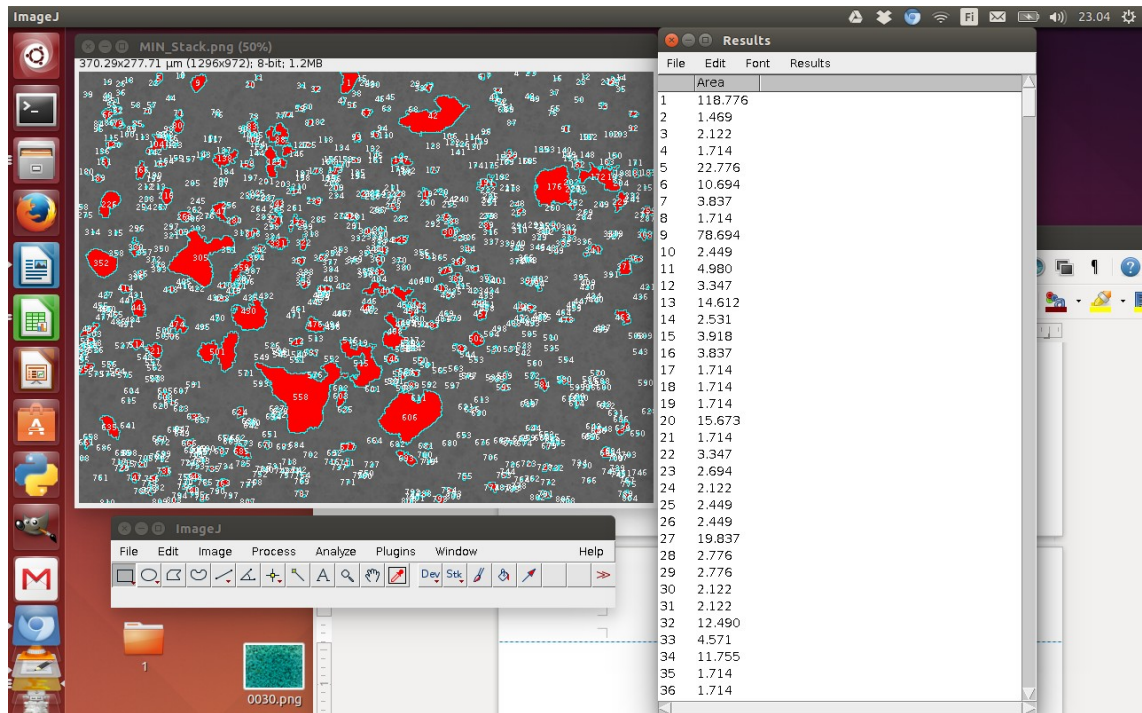
*Kuva B6. Z-projektio pienimmän intensiteetin mukaan*





Kuva B7. Tehdään Z-projektiolle filteröinti, jossa pikseleihin asetetaan pienin arvo 2 pikselin etäisyydeltä.

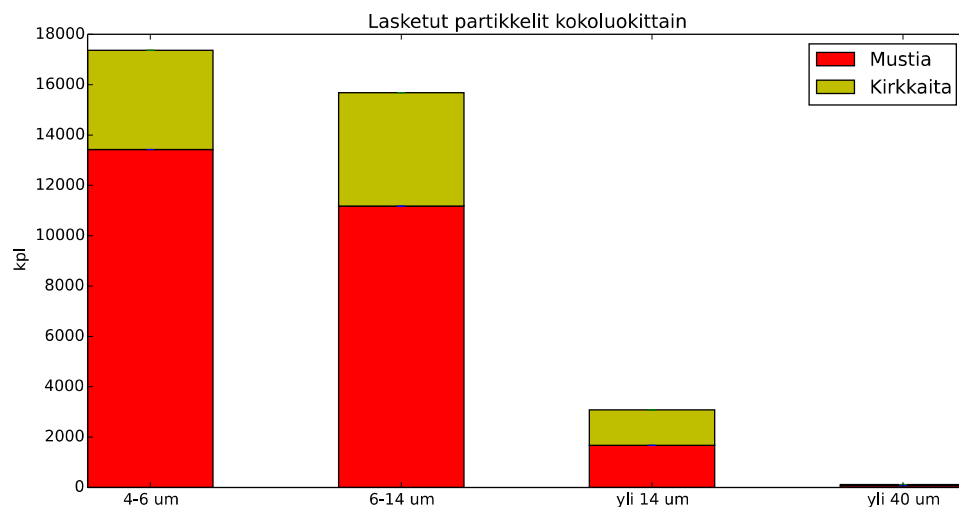
```
run("Minimum...", "radius=2"); // Tehdään binäärinen alipäästösuodatus
run("Threshold...");           // jolloin tietyn raja-arvon alittaville pikseleille
setThreshold(0, MaxM-38);      // annetaan arvo 0 ja ylittävälle 255
```



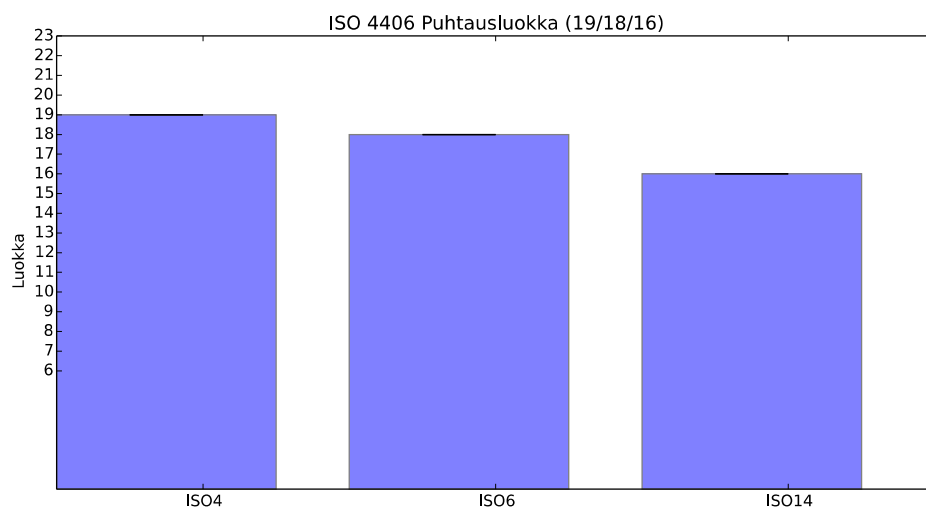
Kuva B8. Partikkelilaskentaominaisuudella saadaan kaikkien kohteiden pinta ala Excel taulukkoon, joka tallennetaan kansioon Analyysi/Results/B/Ec Vastaavasti kuva-tallennetaan kansioon Analyysi/Results/B/Pic

Tämän jälkeen tehdään sama analyysi, mutta kääntäen siten, että lasketaan vaaleat partikkelit. Tulokset tallennetaan kansioon Analyysi/Results/W

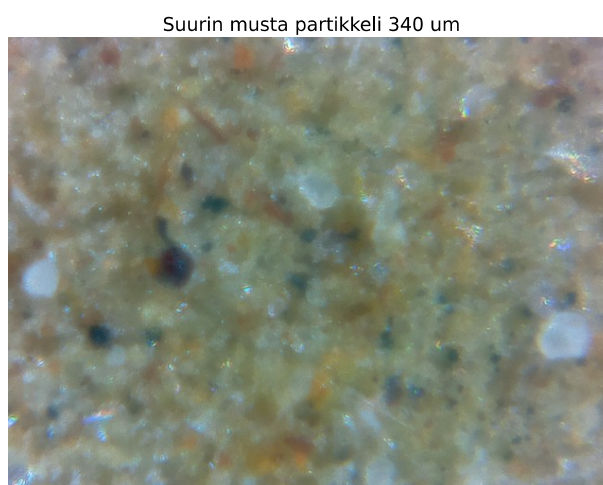
Kun kaikki kuvat on laskettu, lasketaan tulokset:



Kuva B9. Kuvassa on laskettu kaikki partikkelit yhteen ja ilmoitettu kokoluokittain mustat ja kirkkaat erikseen.

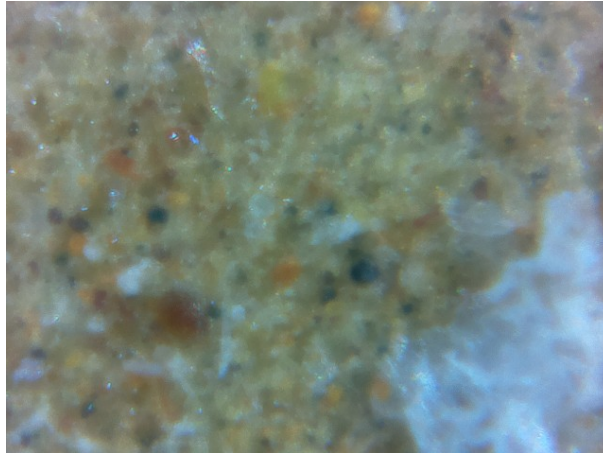


*Kuva B10. Partikkelien kokonaismäärästä lasketaan standardin mukaiset ISO 4406 luokat kaavan (7) avulla. Luokka on ilmoitettu myös kuvan otsikossa. Jos 65% luottamusväli on riittävän suuri muuttamaan tuloksen luokkaa, se ilmoitetaan punaisella lisäpalkilla.*



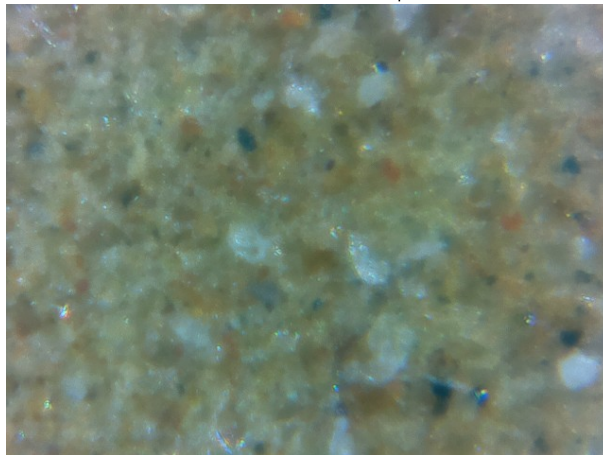
*Kuva B11. Suurin löytynyt musta partikkeli. Kuvan otsikossa on partikkelin pinta-alasta laskettu ympyrän halkaisija.*

suurin kirkas partikkeli 120 um



*Kuva B12. Suurin löytynyt kirkas partikkeli. Kuvan otsikossa on partikkelin pinta-alasta laskettu ympyrän halkaisija.*

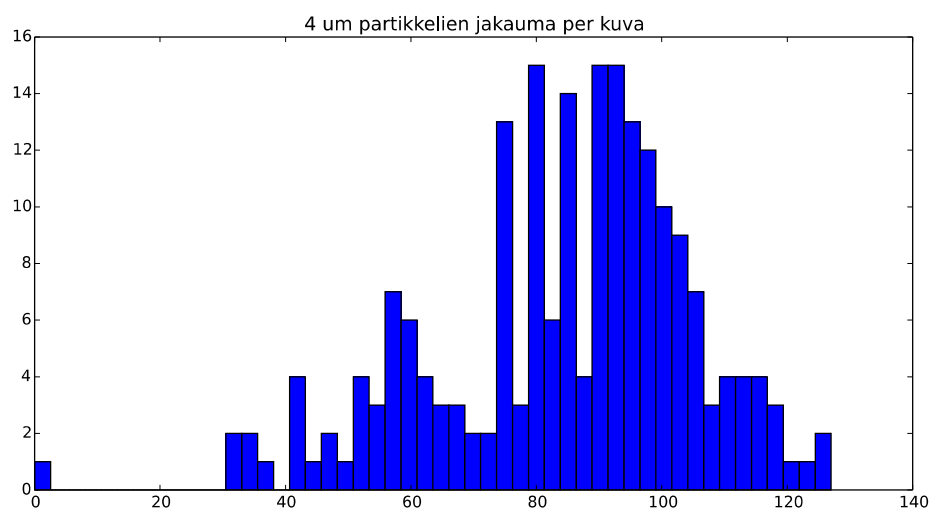
Keskim musta 126 kpl



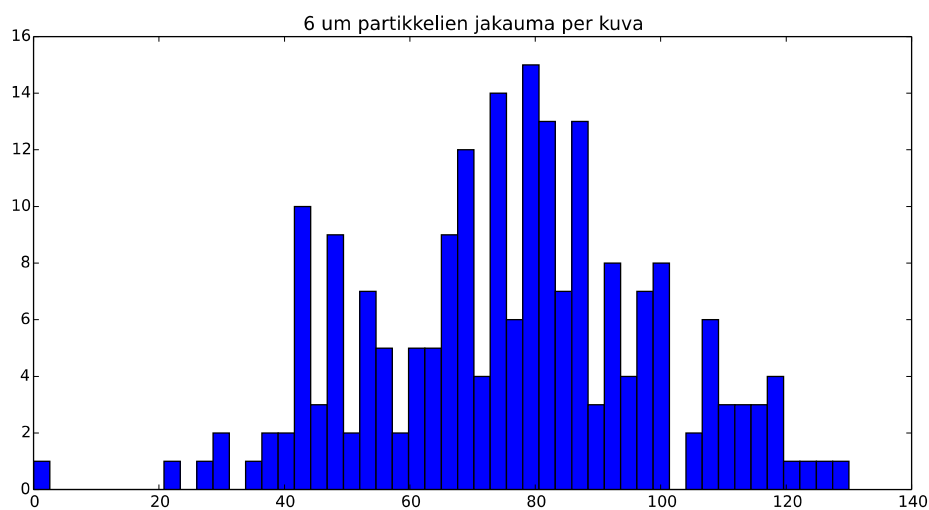
*Kuva B13. Keskimääräisen määrän mustia partikkeleita sisältävä kuva. Keskiarvo on kuvan otsikko. Koska kuva on kaikkien kokoluokkien keskiarvo, se ei välttämättä vastaa kuvissa 15,16 ja 17 esitettyjä jakaumia. Edellä mainituissa jakaumissa on myös laskettu yhteen mustat ja kirkkaat partikkelit.*



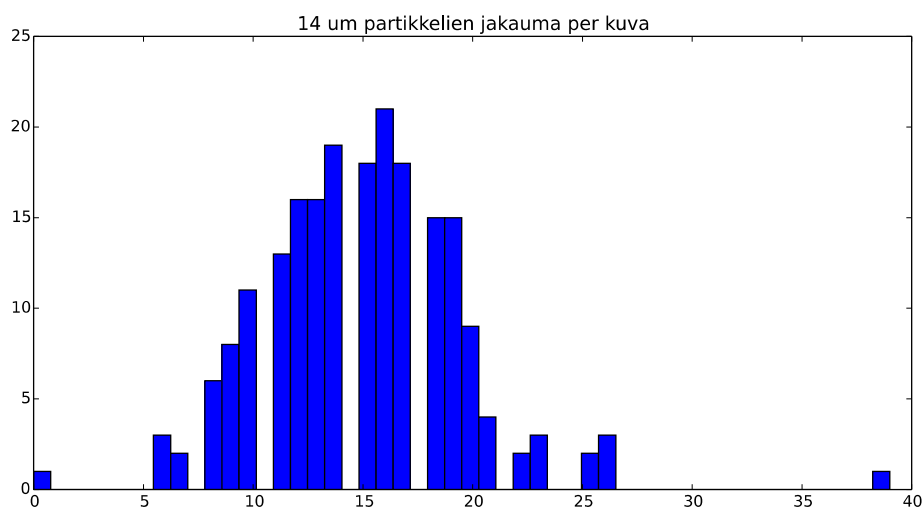
*Kuva B14. Keskimääräisen määrän mustia partikkeleita sisältävä kuva.*



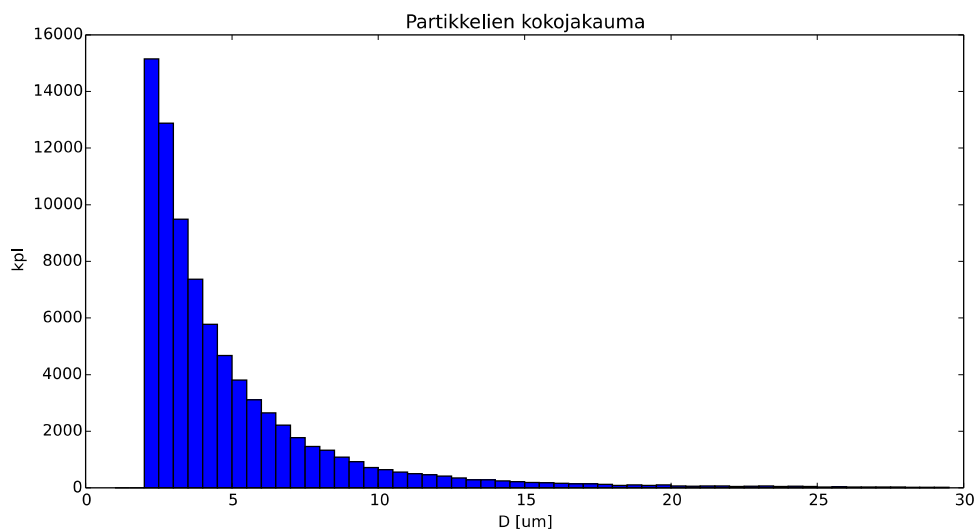
*Kuva B15. 4-6 mikrometrin kokoisten partikkelien jakauma kpl per kuva. Jakauma ei täysin vastaa kuvan B10 ISO 4406-luokkaa, koska jakaumassa ei ole huomioitu 6 mikrometriä suurempia partikkeleita. Jakauman muistuttaessa normaalijakaumaa, voidaan olettaa laskennan toimineen toivotulla tavalla.*



*Kuva B16. 6-14 mikrometrin kokoisten partikkelien jakauma kpl per kuva. Jakauma ei täysin vastaa kuvan B10 ISO4406-luokkaa, koska jakaumassa ei ole huomioitu 14 mikrometriä suurempia partikkeleita. Jakauman muistuttaessa normaalijakaumaa, voidaan olettaa laskennan toimineen toivotulla tavalla.*



*Kuva B17. yli 14 mikrometrin kokoisten partikkelien jakauma kpl per kuva. Jakauma vastaa kuvan B10 ISO 4406-luokkaa.*



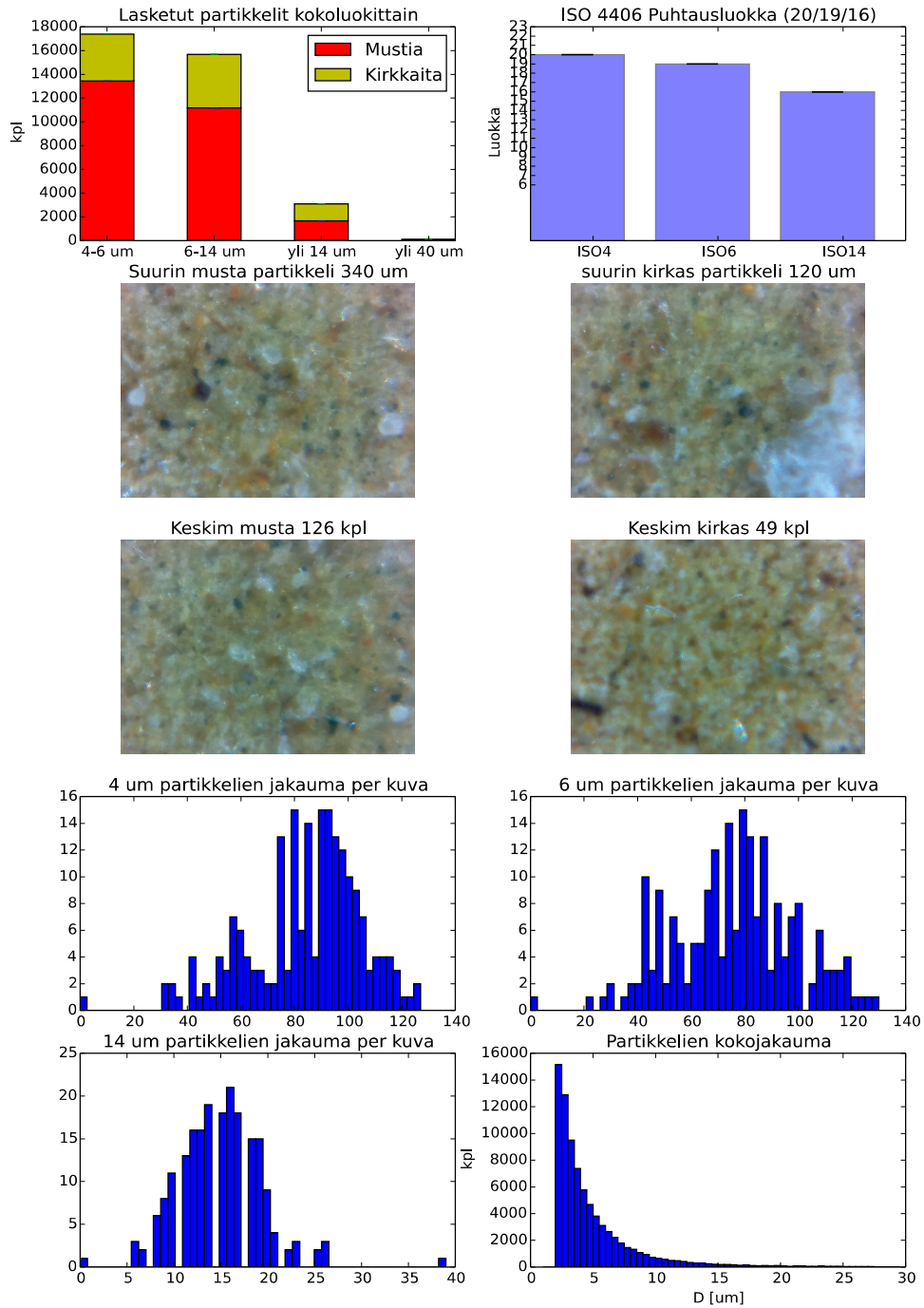
*Kuva B18. Partikkelien kokojakauma. Jakauman tulee olla normaalisti pieniä partikkeleita kohti nouseva. Suurten partikkelien suhteellisen suuri osuus tarkoittaa joko analysoitavassa järjestelmässä tapahtuvaa eroosiota tai mittausvirhettä.*

Mittausraportti koostuu kuvista 9-18. Raportti tallentuu automaattisesti työpöydän kansioon: Analyysi/Results

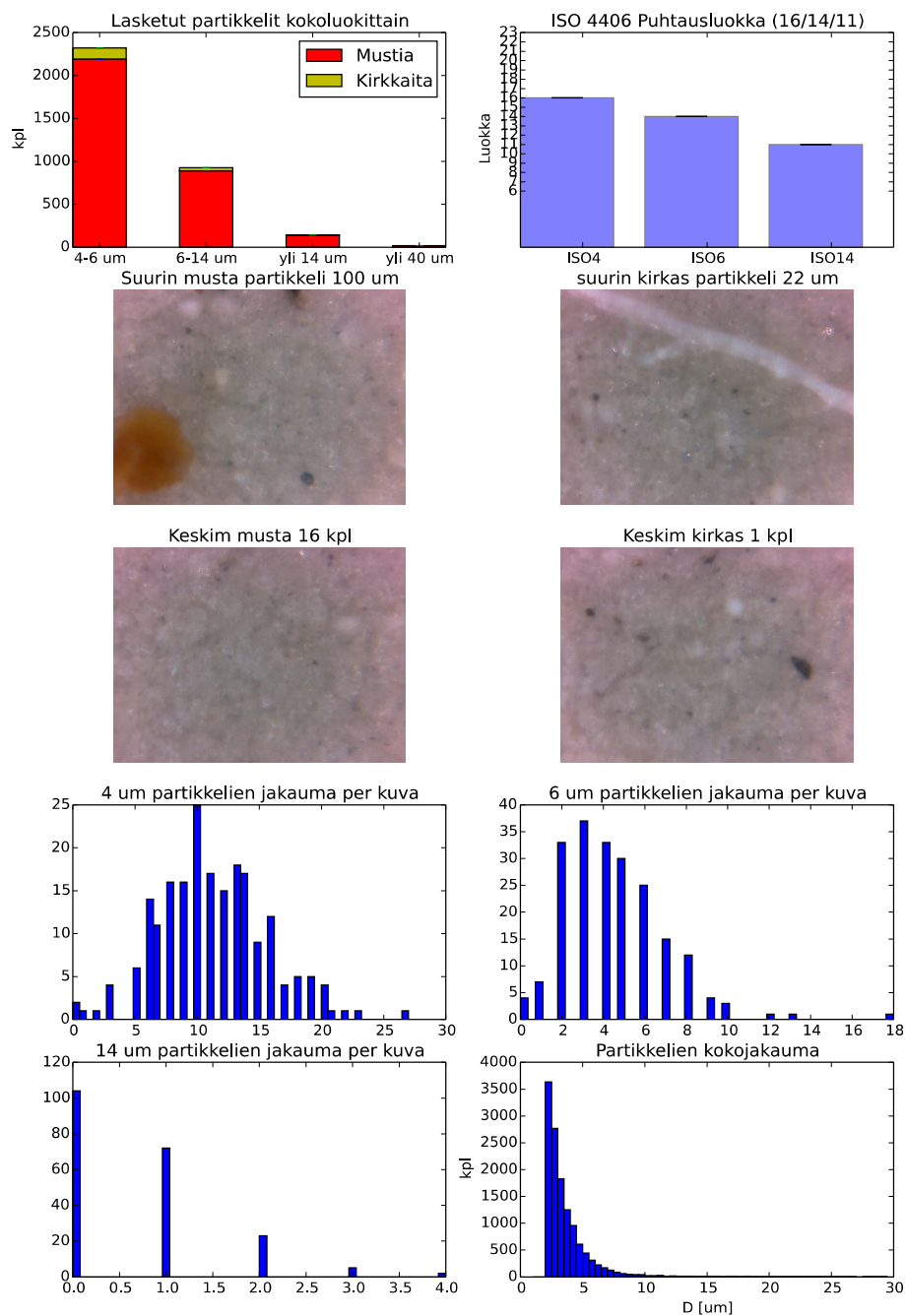
## **LIITE C PUHTAUSTULOKSIA**

Liitteessä on analyysiraportit partikkelilaskennan tuloksista. Raporttien membranien kuvat ovat: Kuva 5 s. 12 ja Kuva 10, s.17

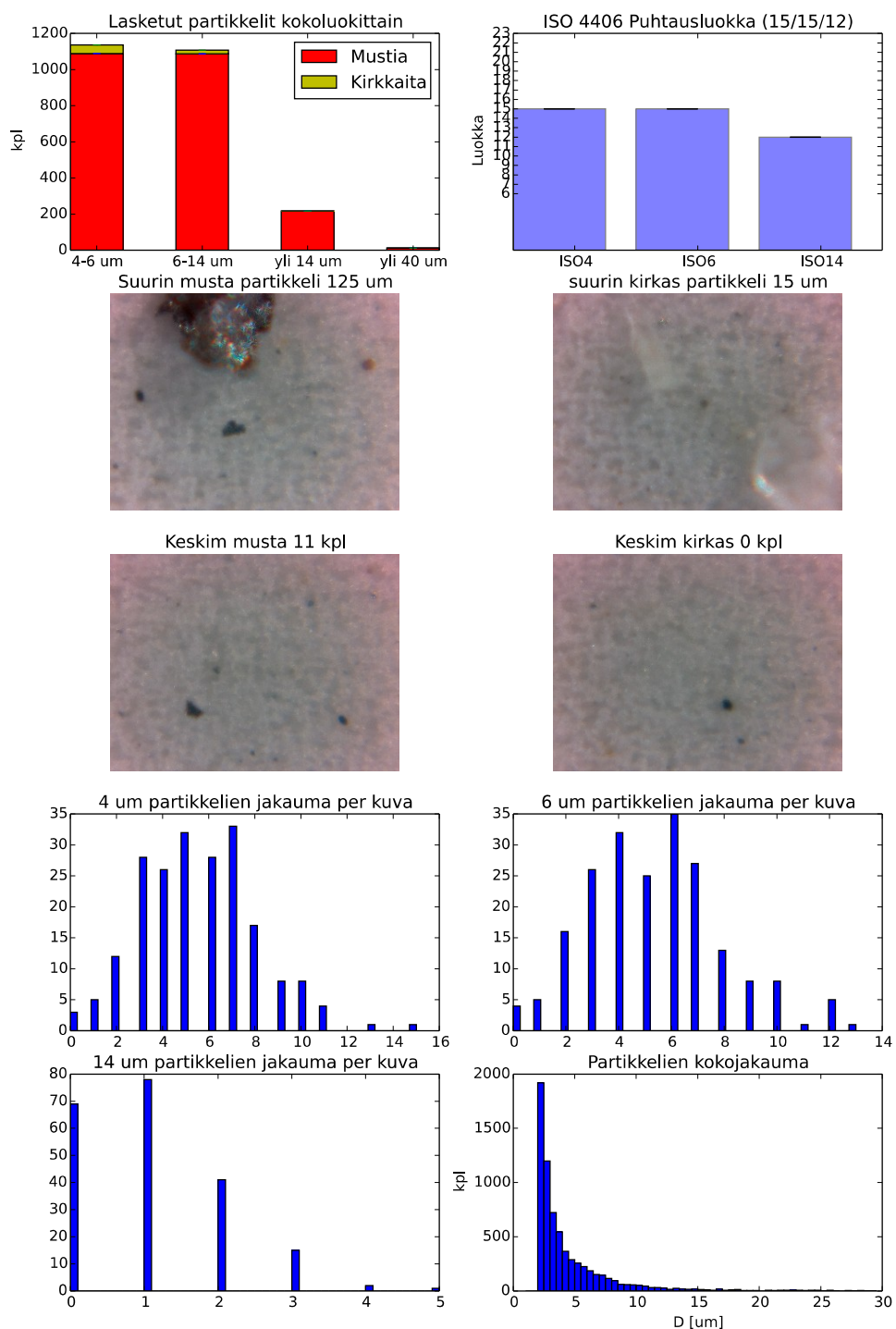




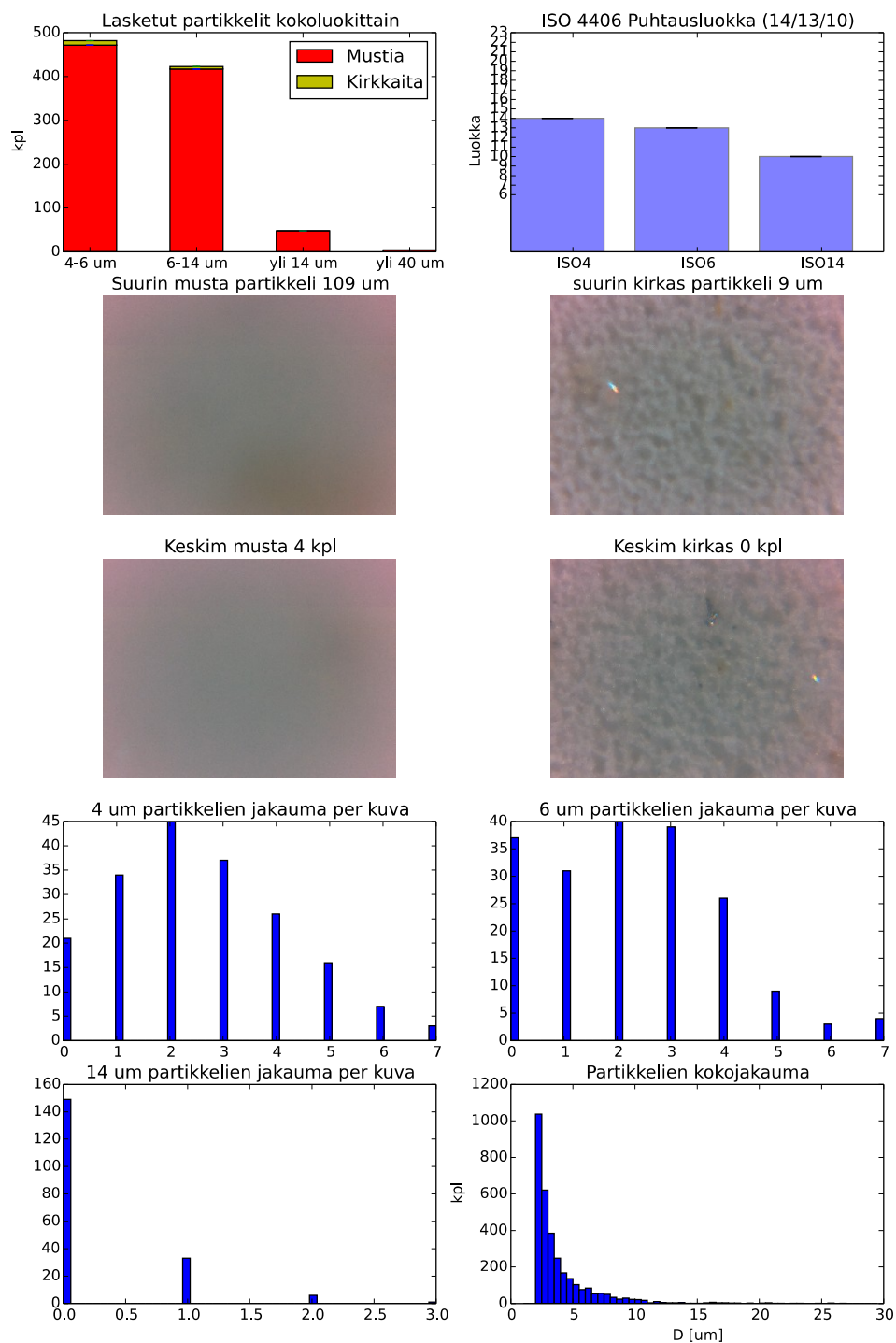
Kuva C1. Analyysiraportti hammasvaihde positio 0120648, membrani kuvassa 10, s.



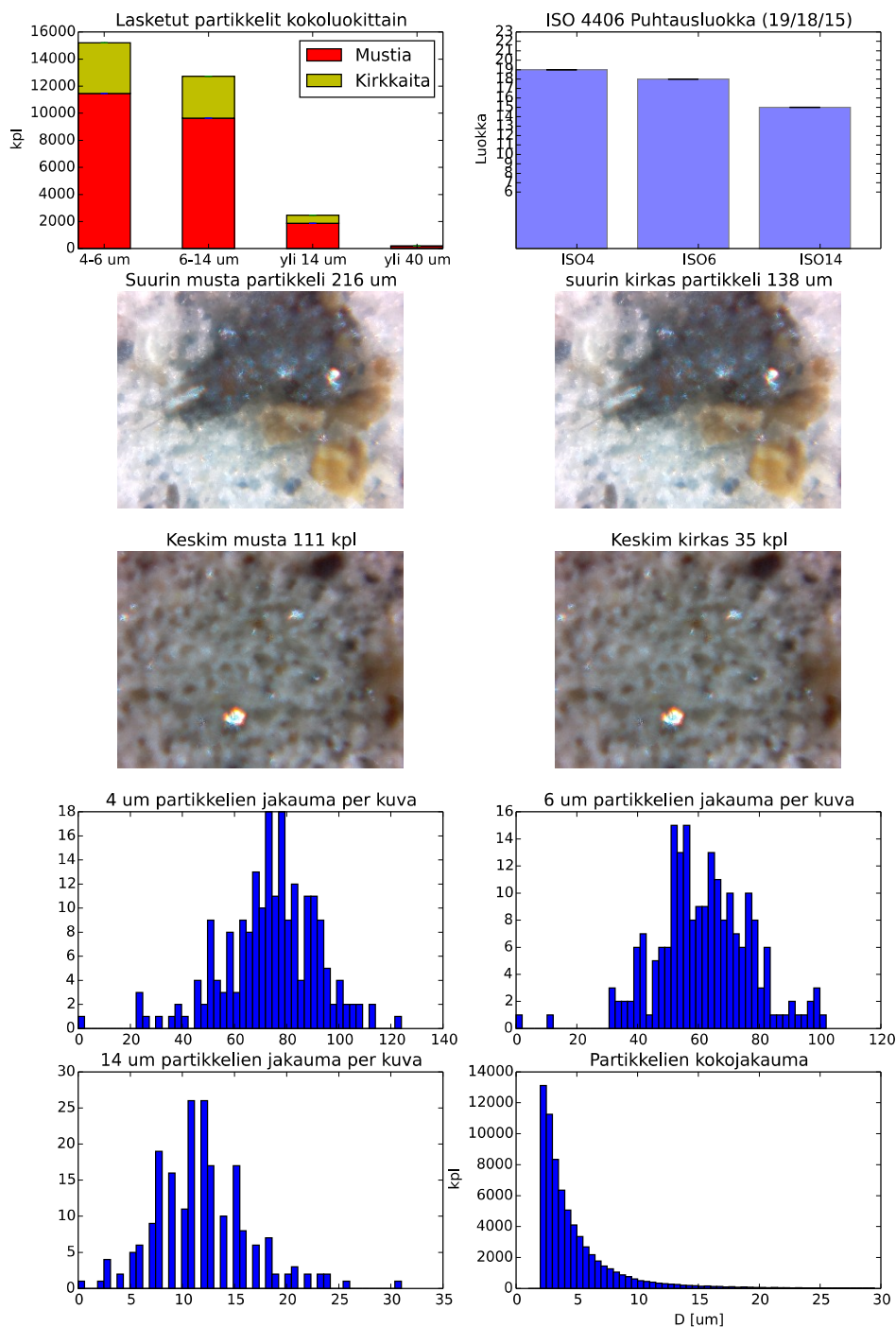
Kuva C2. Analyysiraportti positio 012201 Kannatustela, membrani kuvassa 5, s. 14



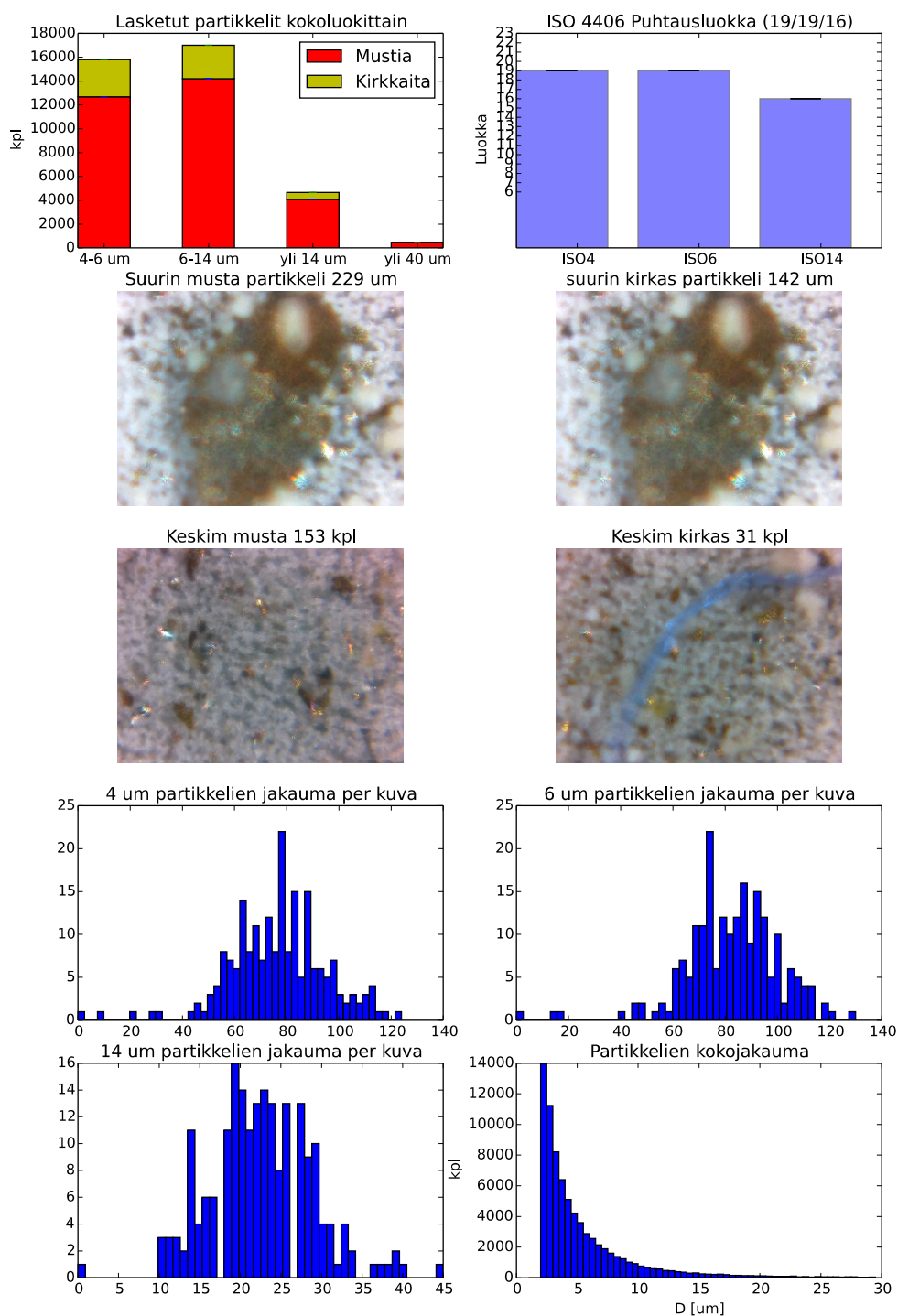
Kuva C3. Analyysiraportti positio 012201 Limitystela, membrani kuvassa 5, s. 14



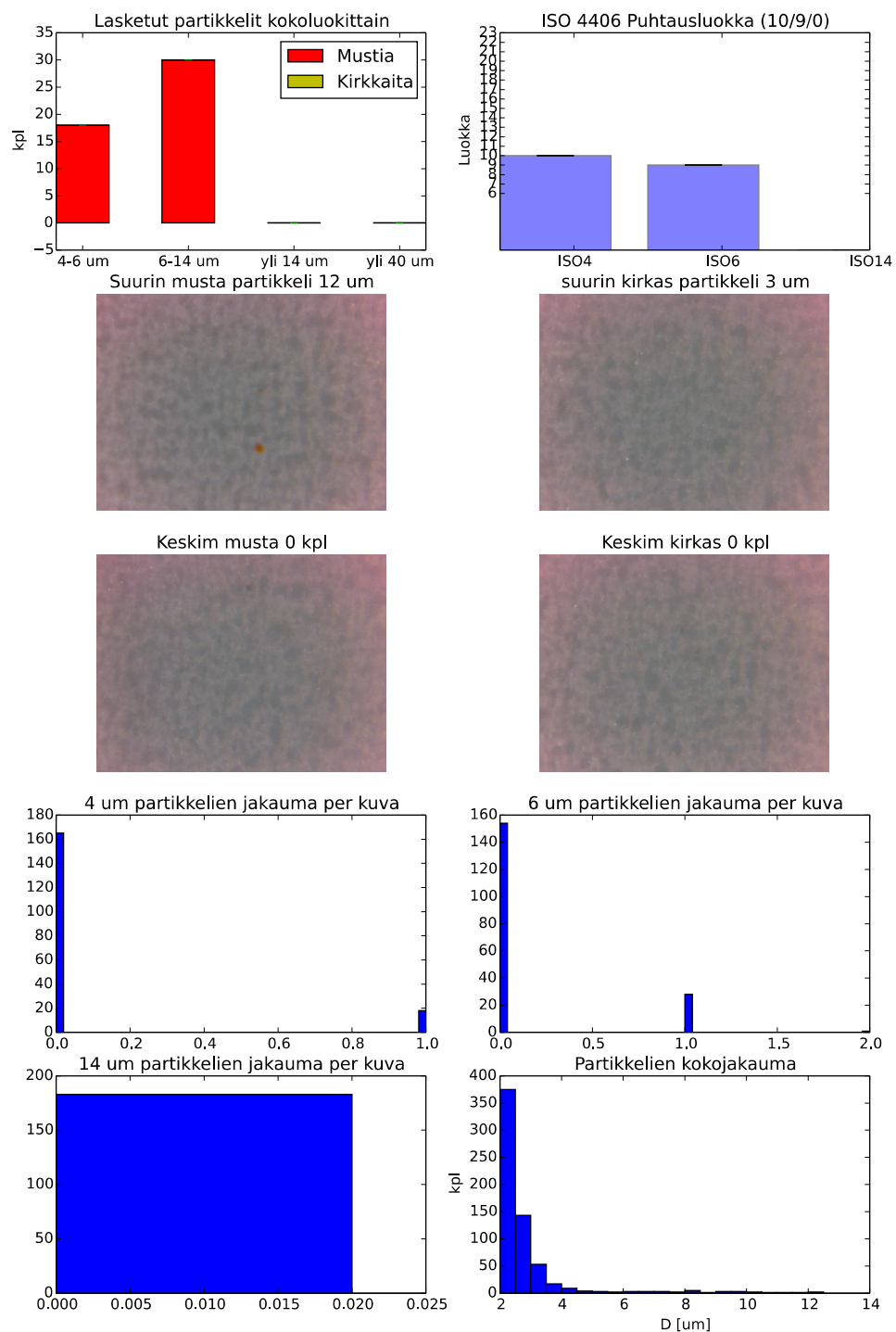
Kuva C4. Analyysiraportti positio 012201 Poikkileikkuri, membrani kuvassa 10, s. 20



Kuva C5. Analyysiraportti Kuivatuskone 1 käyttöryhmän 1 käyttö, membrani kuvassa 5, s. 14



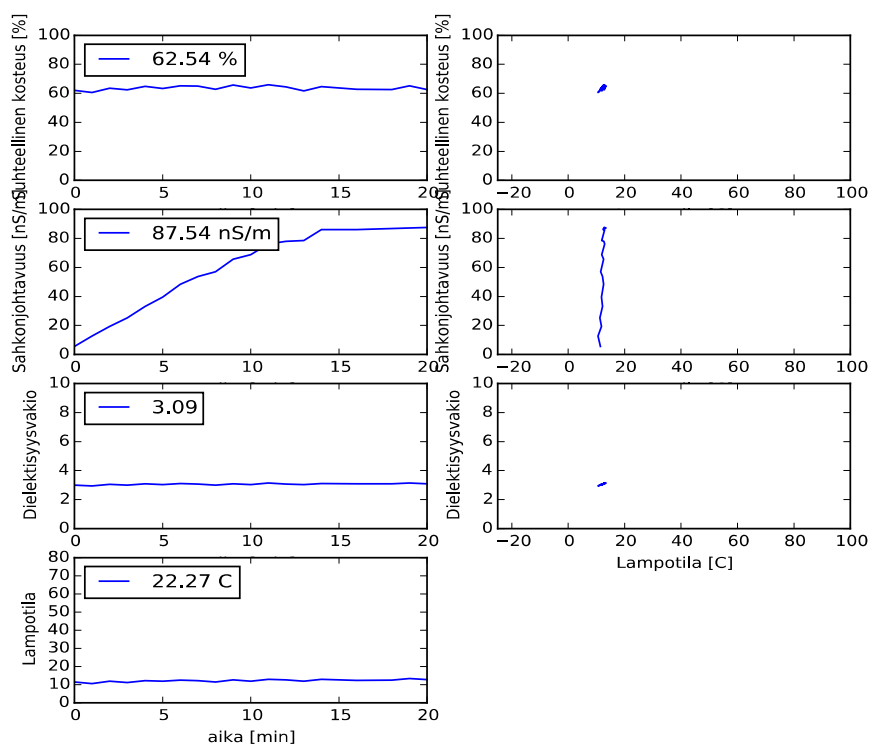
Kuva C6. Analyysiraportti positio 4501003, membrani kuvassa 10, s. 20



Kuva C7. Analyysiraportti vertailunäyte puhdas valopetroli, membrani kuvassa 5, s. 14

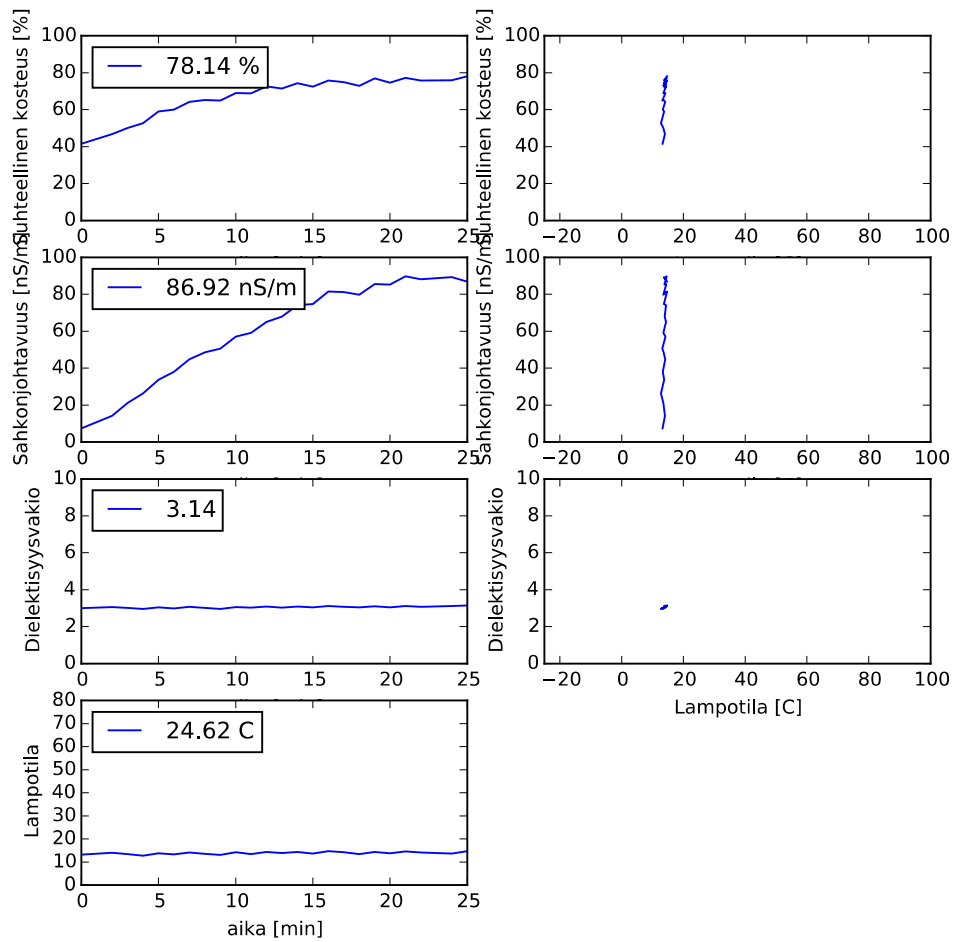
## LIITE D HLB 1400 TULOKSIA

Mittattiin 500 ml näytettä Neste hydraulii super 32 -hydrauliikkaöljyä lisäämällä n. 0.5 ml vettä jokaisen mittauksen jälkeen. Mittaukset ovat alla mittausjärjestyksessä:

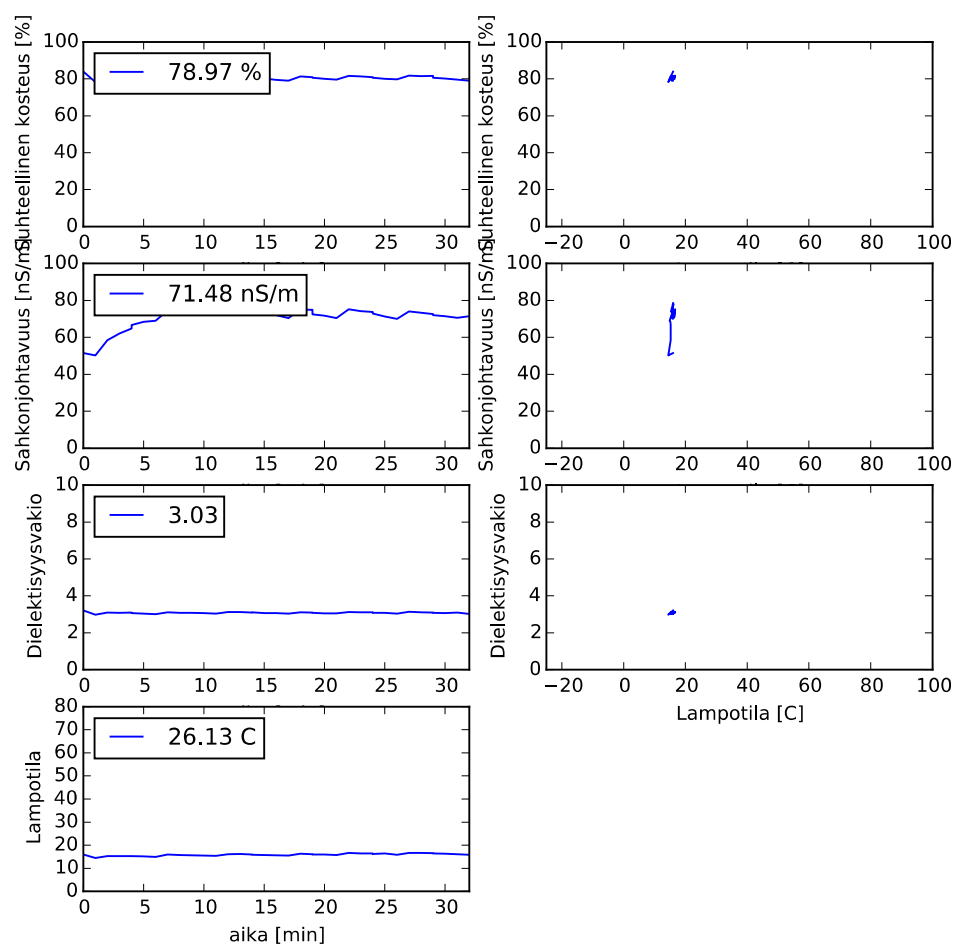


Kuva D1. Lähtötilanne.

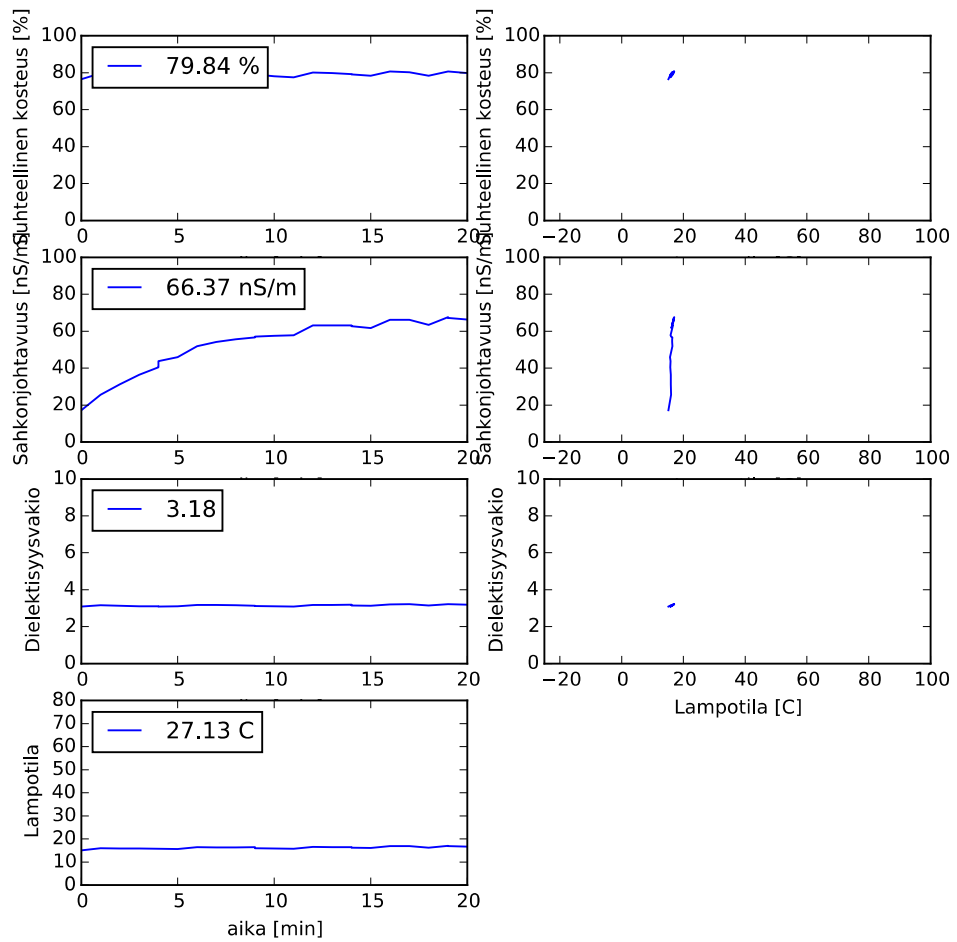




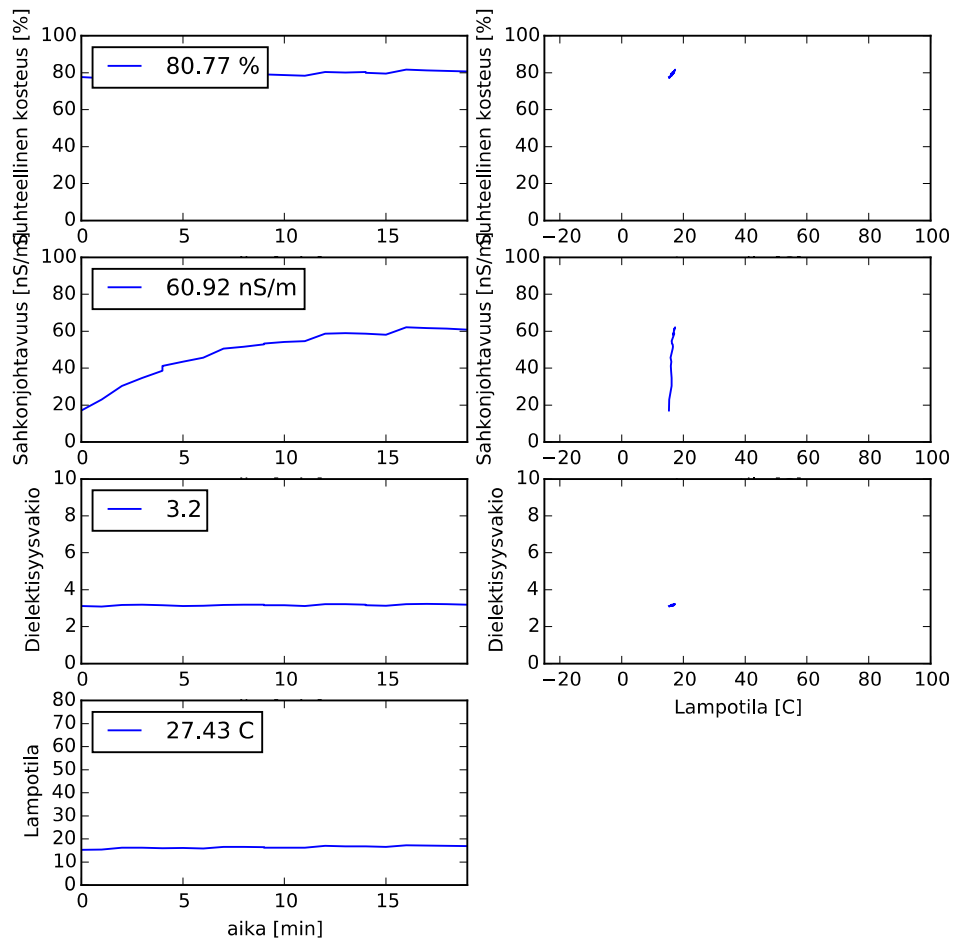
Kuva D2. Mittaustulos 0.5 ml vedenlisäyksen jälkeen



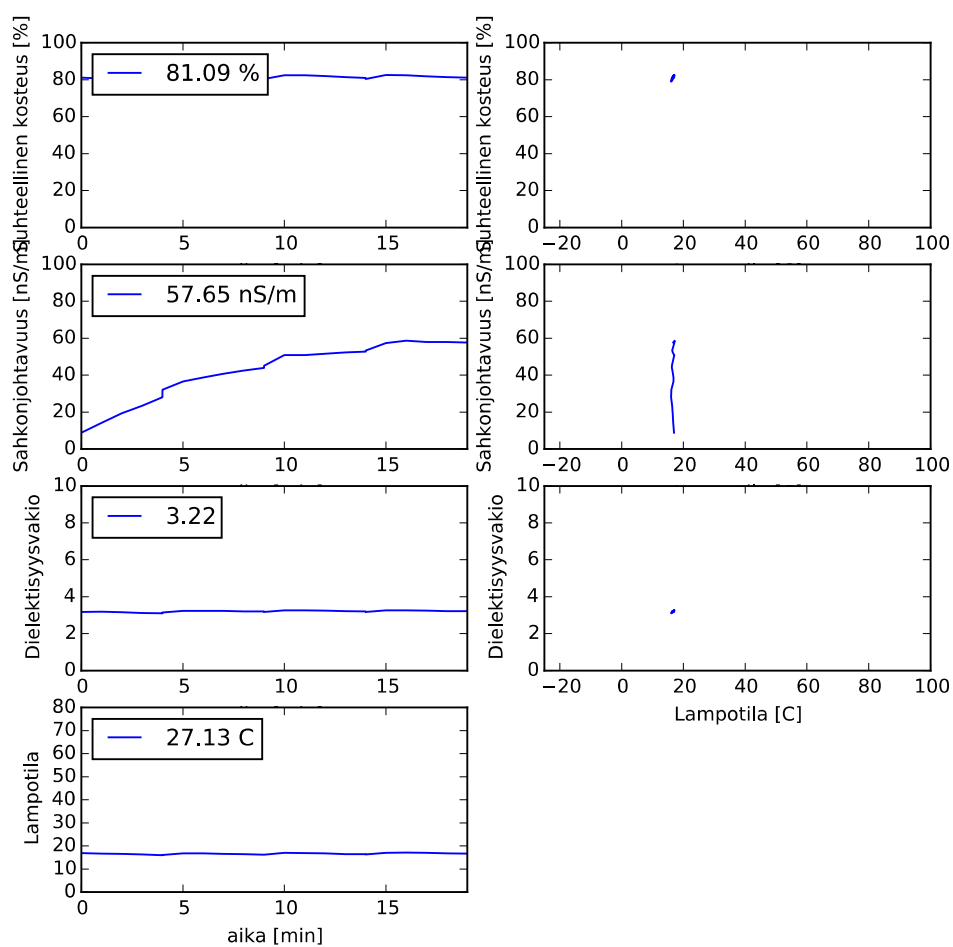
Kuva D3. Mittaustulos 1 ml vedenlisäyksen jälkeen



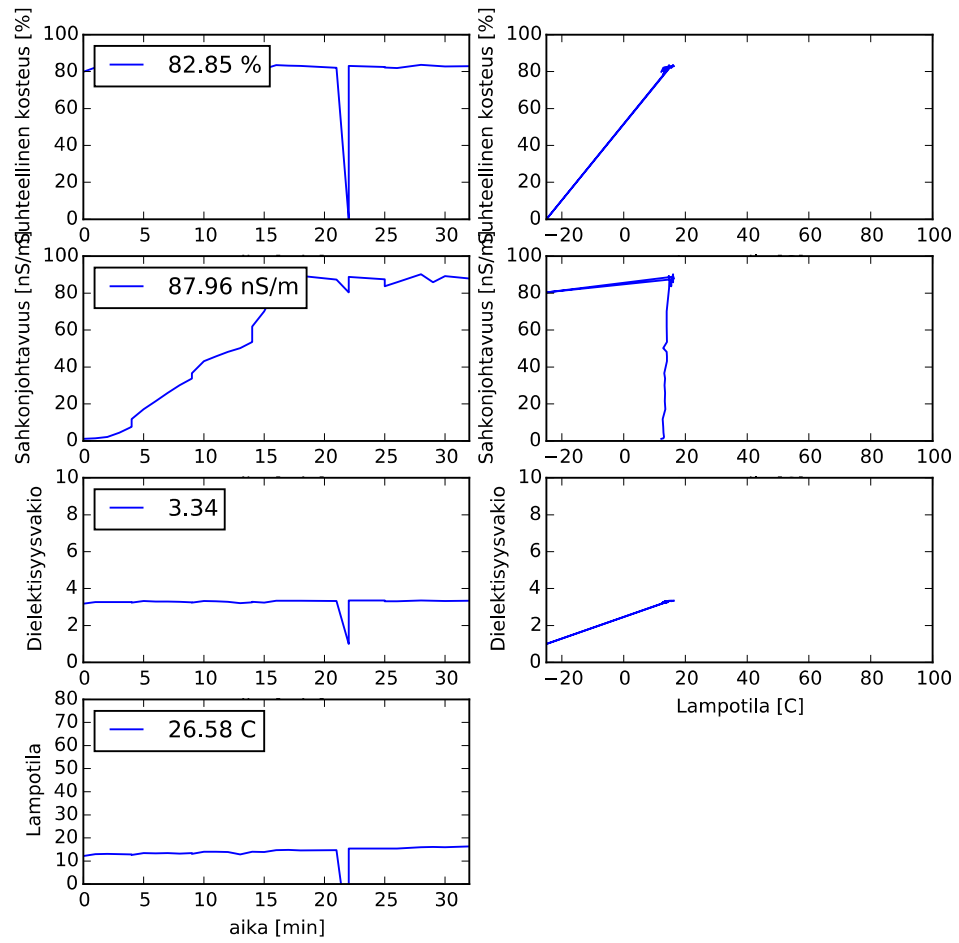
Kuva D4. Mittaustulos 1.5 ml vedenlisäyksen jälkeen



Kuva D5. Mittaustulos 2 ml vedenlisäyksen jälkeen



Kuva D6. Mittaustulos 2.5 ml vedenlisäyksen jälkeen



Kuva D7. Mittaustulos 3 ml vedenlisäyksen jälkeen

## LIITE E VISKOSITEETTIMITTAUSTEN TULOKSIA

Brookefield viskositeettimittauksista saadut tulokset kahdessa eri lämpötilassa kirjattiin taulukkoon E1.

*Taulukko E1. Viskositeettimittaukset.*

M1	SPD1	RPM1	T1	M2	SPD2	RPM2	T2	Nimi
11	5	100	21.8	3.3	5	100	40	UUSI150spin5
48.5	3	100	22	12.6	3	100	44.5	012201Vetotela
48.1	3	100	22	12.6	3	100	45.1	012201Limitystela
47.4	3	100	22	12.7	3	100	44.3	012201Poikkileikkuri
44.6	3	100	22	12.1	3	100	44.7	Käyttöryhmä
83.6	3	100	22	20.6	3	100	45.2	Viiiran imutela
23.7	5	100	22	21.5	3	100	44.8	120686
23.5	5	100	22	21.8	3	100	44.6	12250302
22.9	5	100	22	21.7	3	100	44.7	120648
25.1	5	100	22	21.7	3	100	44.9	12250202
7.2	5	100	32	4.65	5	100	40.9	30507
48.2	3	100	21.7	17.7	3	100	38	UUSI150
72.7	3	100	22	28.3	3	100	38.5	UUSI220S
12.4	3	100	21.8	7.3	3	100	38.8	UUSI46S
9.3	3	100	21.8	6.2	3	100	38.2	UUSIATF
61.8	3	100	18.7	12.3	3	100	52.5	UUSI220S2
89	3	100	21.7	15	3	100	48.2	UUSI320
97.2	3	100	22	14.3	3	100	52.6	12250202B
49.3	3	50	22	14.2	3	100	52.1	0120686B
98.9	3	100	22	14.3	3	100	51.8	12250302B
99.5	3	100	22	14.3	3	100	52.6	14200102B
53.8	3	100	22	12.5	3	100	52.1	TULPPARUUUVI

Alla oleva Python-ohjelma lukee taulukosta kaksi riviä ja piirtää mitatut viskositeetti-  
tiarvot kaavojen 15-19, s. 26 avulla lämpötilan funktiona.

```
import xlrd
import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import os.path
wb = xlrd.open_workbook(os.path.join('/home/anssi/Desktop','ViskoTiedot.xlsx'))
```

```

#Excel tiedoston polku
wb.sheet_names()
sh = wb.sheet_by_index(0)
i=2 #öljyn mittaustulosten rivi numer Excel-taulukossa
j=13 #vertailuöljyn mittaustulosten rivi numero excel-taulukossa
M1=0
#luetaan mittaustulokset Excel taulukosta:
i=i-1
j=j-1
while M1== 0:

```

```

    M1 = sh.cell(i,0).value
    SP1 = sh.cell(i,1).value
    RPM1 = sh.cell(i,2).value
    T3 = sh.cell(i,3).value
    M2 = sh.cell(i,5).value
    SP2 = sh.cell(i,6).value
    RPM2 = sh.cell(i,7).value
    T4 = sh.cell(i,8).value
    NAME = sh.cell(i,10).value
    M1ref=sh.cell(j,0).value
    SP1ref = sh.cell(j,1).value
    RPM1ref = sh.cell(j,2).value
    T3ref = sh.cell(j,3).value
    M2ref = sh.cell(j,5).value
    SP2ref = sh.cell(j,6).value
    RPM2ref = sh.cell(j,7).value
    T4ref = sh.cell(j,8).value
    NAMEref = sh.cell(j,10).value
    v1=sh.cell(j,11).value
    v2=sh.cell(i,12).value
    Tiheys=sh.cell(i,13).value

```

```

def vc(A,B,T):
    v=10**(10**(A-B*math.log10(float(T+273.15))))-0.7
    #Kaava 12 viskositeetin laskemiseksi halutussa lämpötilassa
    return v

```

```

#spindelivakiot

```

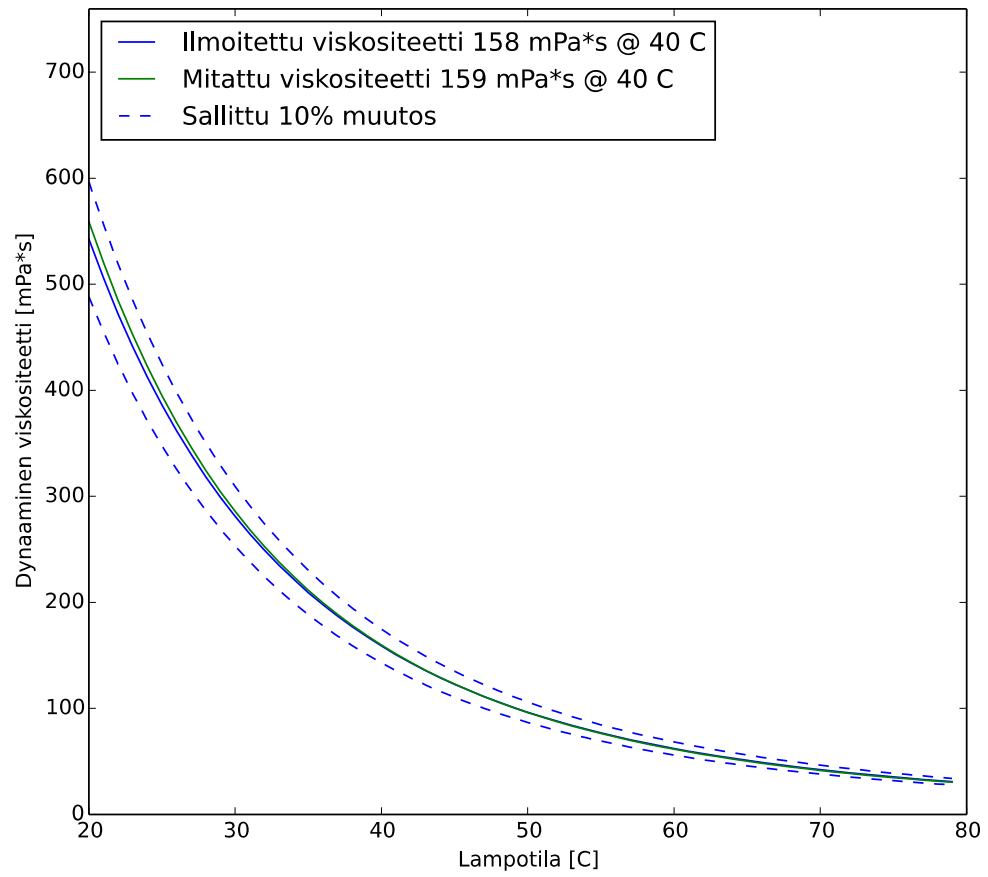


```

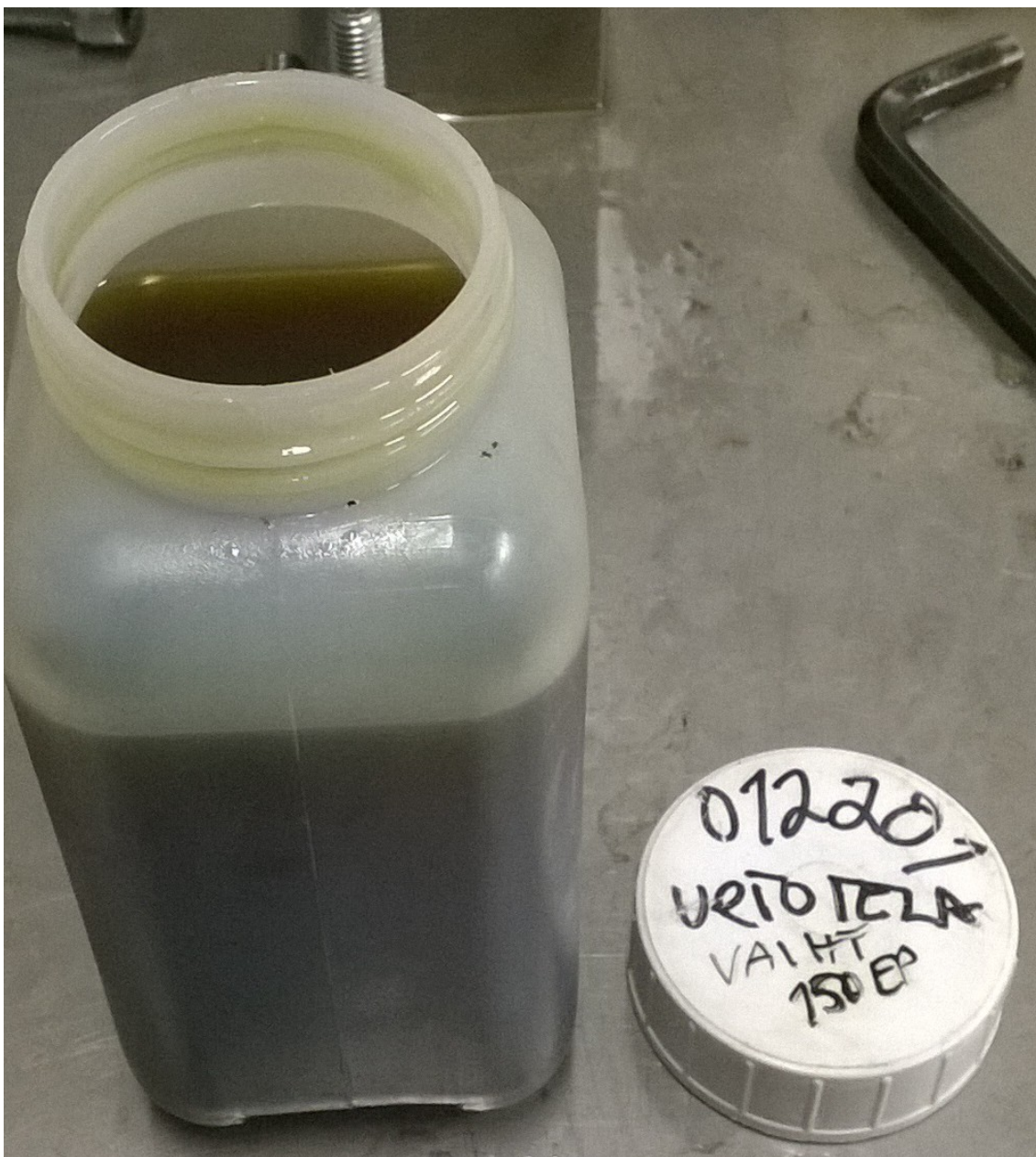
SPC=[0,100.0,400.0,1000.0,2000.0,4000.0,10000.0,20000.0]
#lasketaan viskositeetti mittaus tuloksille
v1=M1ref*SPC[int(SP1ref)]/(RPM1ref)
v2=M2ref*SPC[int(SP2ref)]/(RPM2ref)
T1=T3ref+273.15
T2=T4ref+273.15
T3=T3+273.15
T4=T4+273.15
v3=M1*SPC[int(SP1)]/(RPM1)
v4=M2*SPC[int(SP2)]/(RPM2)
#lasketaan vakiot A ja B mittaus tuloksille
B1=(math.log10(math.log10(v2+0.7))-math.log10(math.log10(v1+0.7)))/
(math.log10(T1)-math.log10(T2))
A1=math.log10(math.log10(v2+0.7))+B1*math.log10(T2)
B2=(math.log10(math.log10(v4+0.7))-math.log10(math.log10(v3+0.7)))/
(math.log10(T3)-math.log10(T4))
A2=math.log10(math.log10(v4+0.7))+B2*math.log10(T4)

V1=np.array([])
V2=np.array([])
#Lasketaan viskositeetti asteen välein 0-100 astetta C
for T in range(0,100):
    V1=np.append(V1,vc(A1,B1,T))
    V2=np.append(V2,vc(A2,B2,T))
#Piirretään kuvaaja
FIG1=plt.figure(figsize=(8,8))
plt.plot(range(0,100),V1,label='Ilmoitettu viskositeetti ' + str(int(V1[40])) + ' mPa*s @ 40 C')
plt.plot(range(0,100),V2,label='Mitattu viskositeetti ' + str(int(V2[40])) + ' mPa*s @ 40 C')
plt.plot(range(0,100),V1*1.1,linestyle='--',color='b',label='Sallittu 10% muutos')
plt.plot(range(0,100),V1*0.9,linestyle='--',color='b')
plt.axis((20,80,0,1.4*V1[20]))
plt.ylabel('Dynaaminen viskositeetti [mPa*s]')
plt.xlabel('Lampotila [C]')
plt.legend(loc='upper left')
plt.show()
if type(NAME) is float:
    NAME=str(int(NAME))
plt.savefig('Viskositeetti_' + NAME + '.svg',dpi=200)

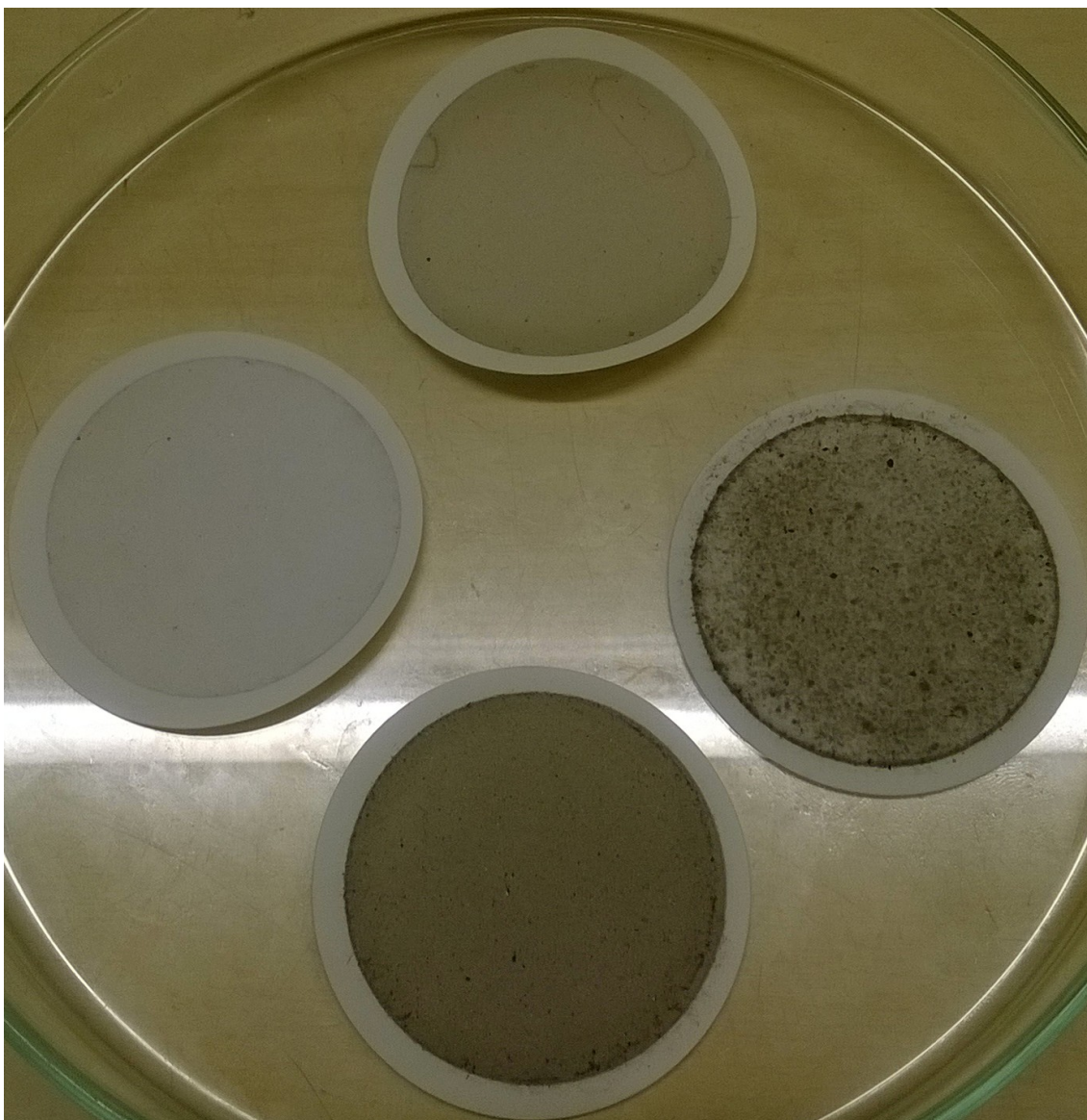
```



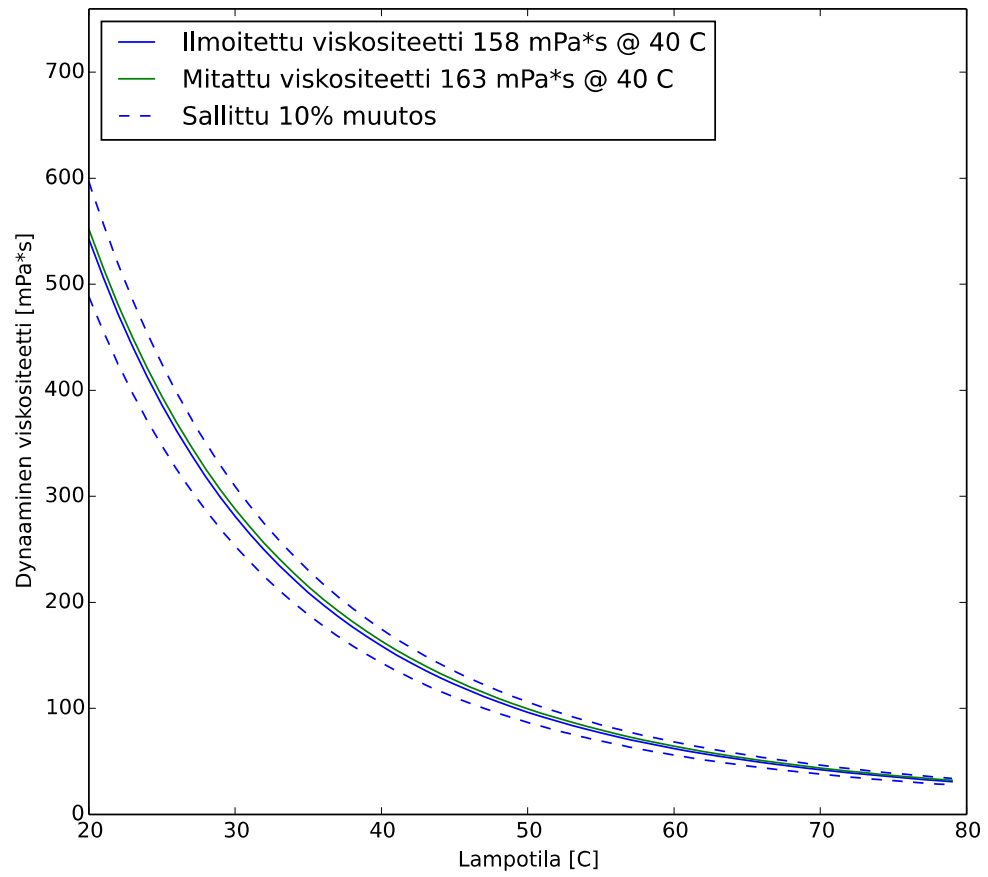
*Kuva E1. Position 012201 Vetotela viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 150 EP.*



*Kuva E2. Näytteessä ei ole ulkoisesti havaittavissa kulumisen merkkejä. Väri on tumma mutta haju ja läpikuultavuus normaali. Membranille jäi hyvin likainen suodos (Kuva E3)*



*Kuva E3. Ylhäällä Kannatustela, vasemmalla, limitystela, alhaalla 1 käyttöryhmän käyttö, oikealla vetotela.*

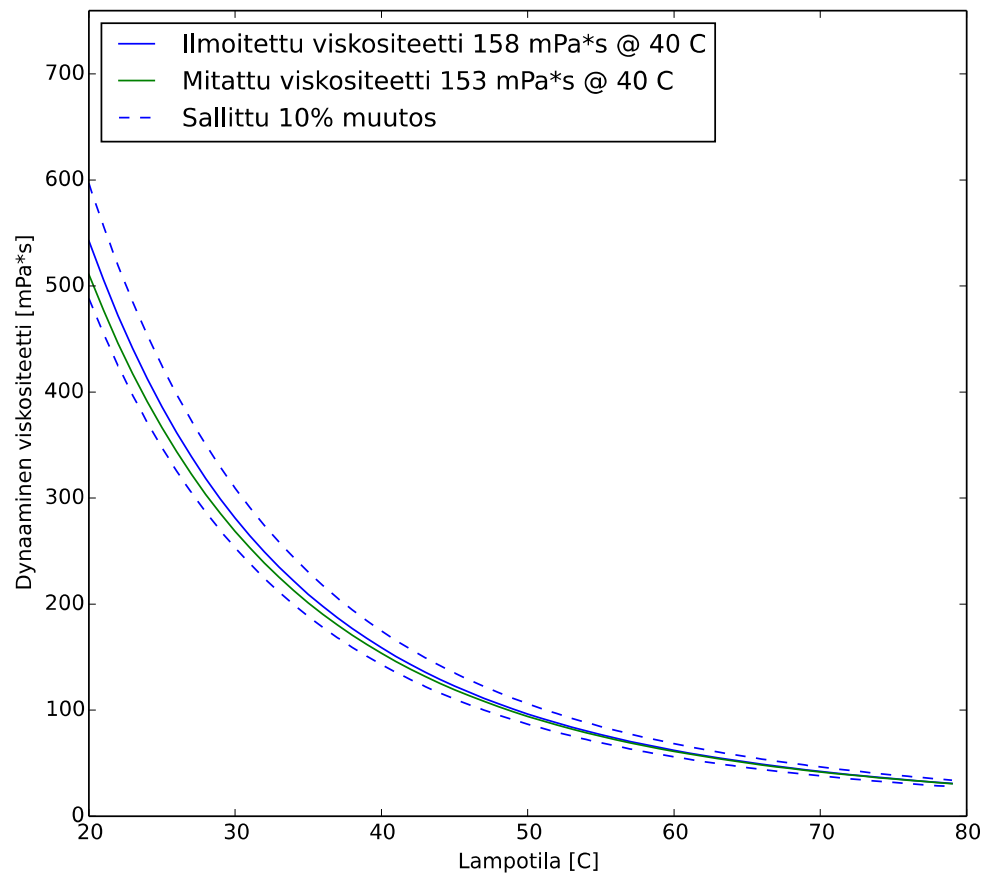


*Kuva E4. Position 012201 Limitystela viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteis-  
to 150 EP.*





Kuva E5. Näytteen väri ja läpikuultavuus normaali. Membrani kuvassa E3. Puhtaus-tulos liitteessä 3 (15/15/12).

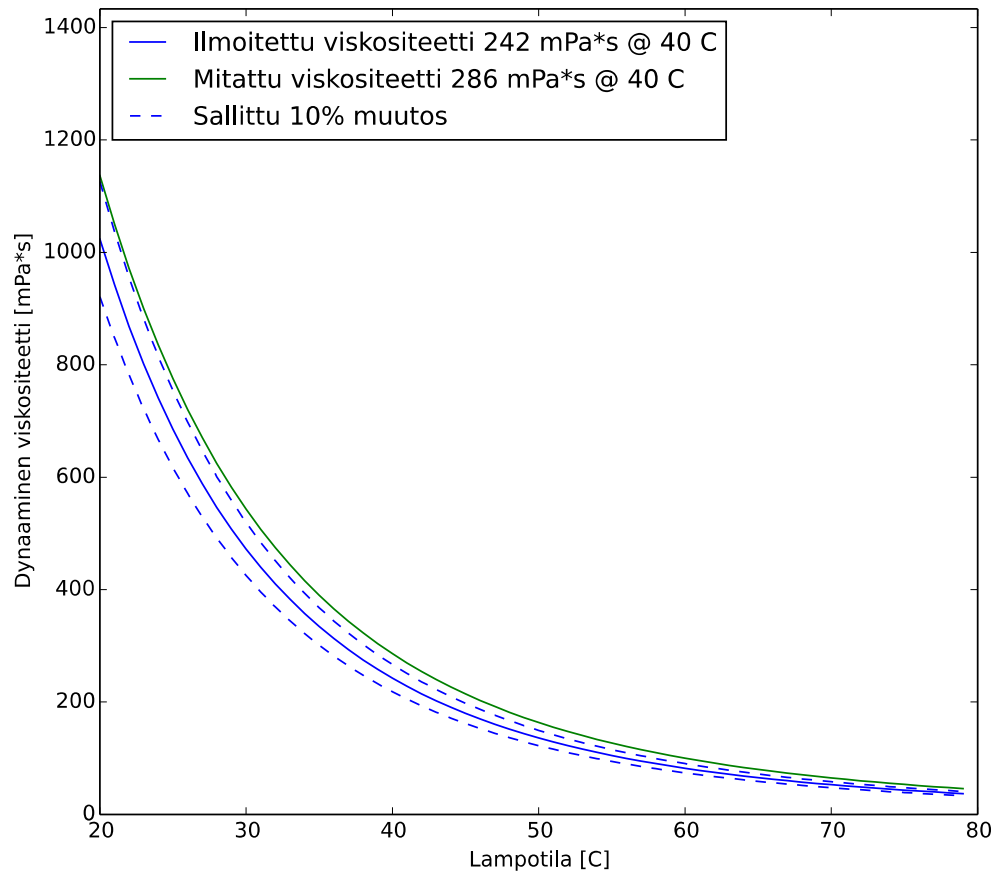


Kuva E6. Käyttöryhmä 1 käyttö, viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 150 EP.

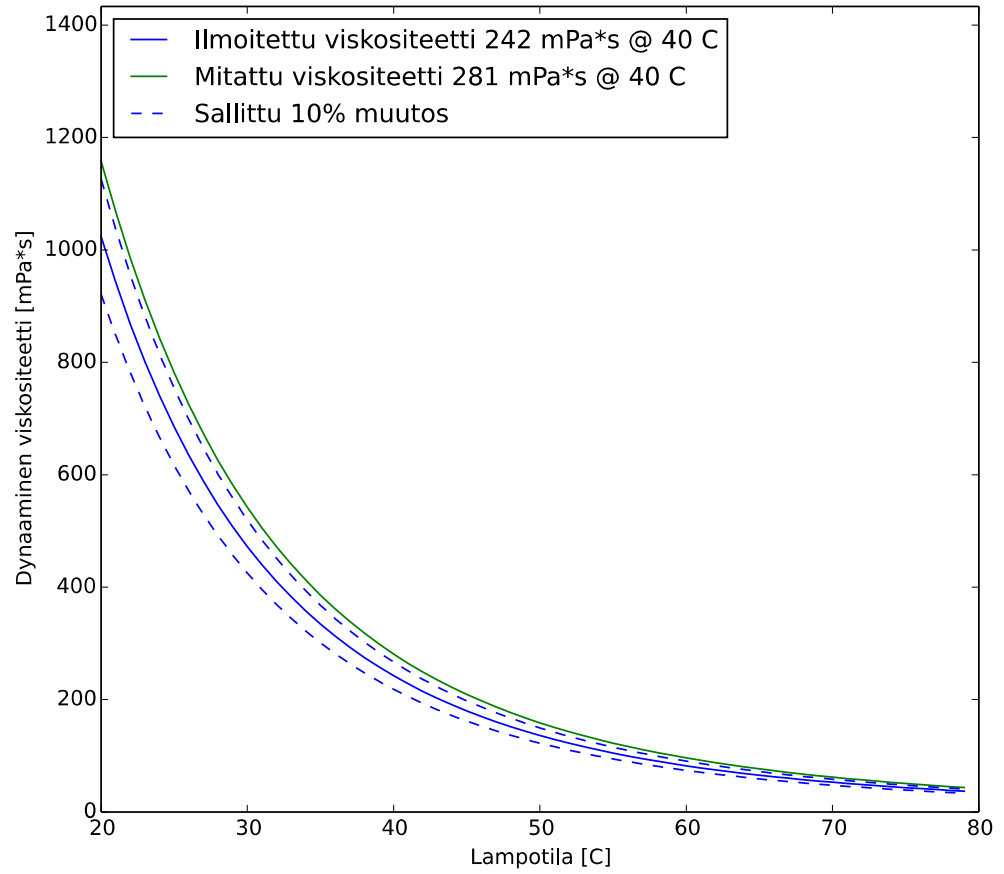


*Kuva E7. Väri tumma. Membrani kuvassa E3.*

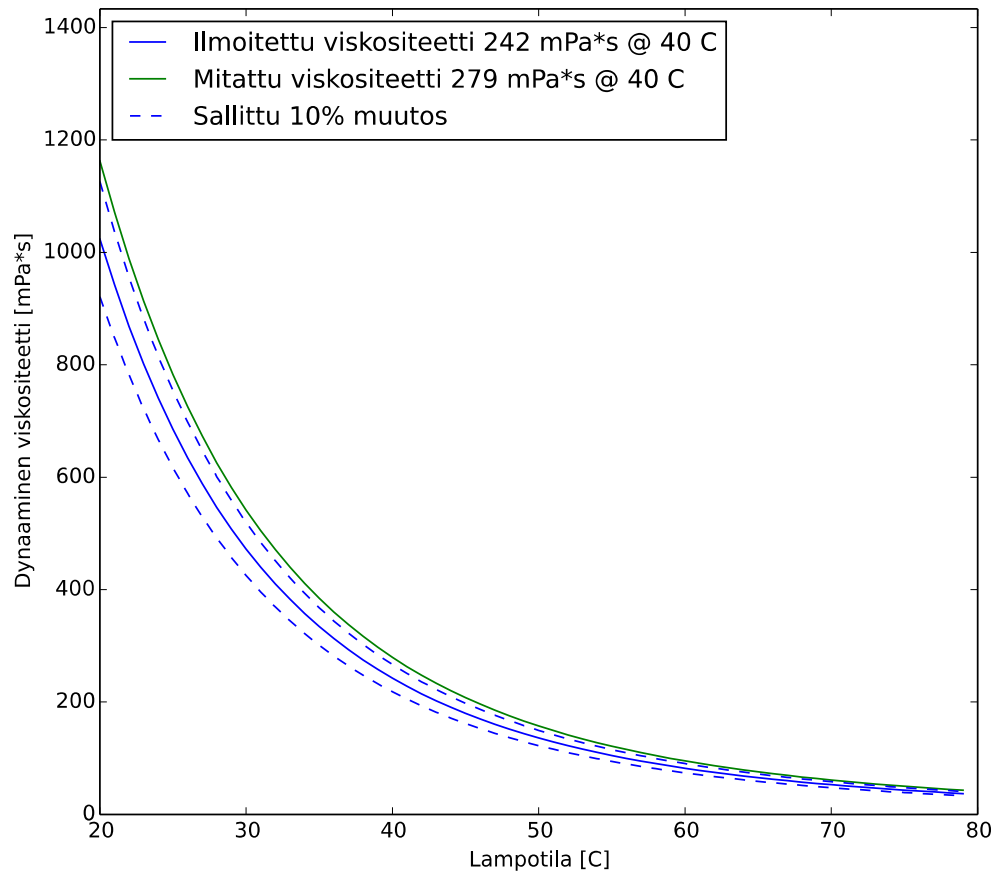




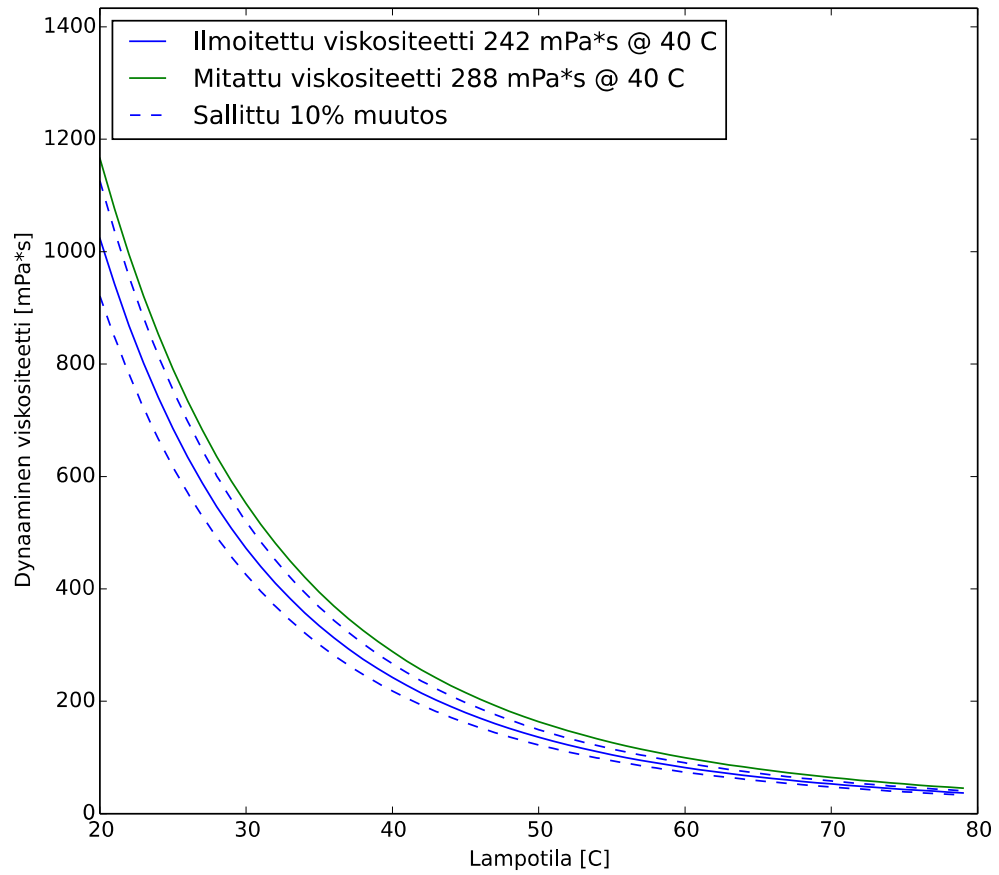
*Kuva E8. Position 12250202 hammasvaihteen öljyn viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 320 EP*



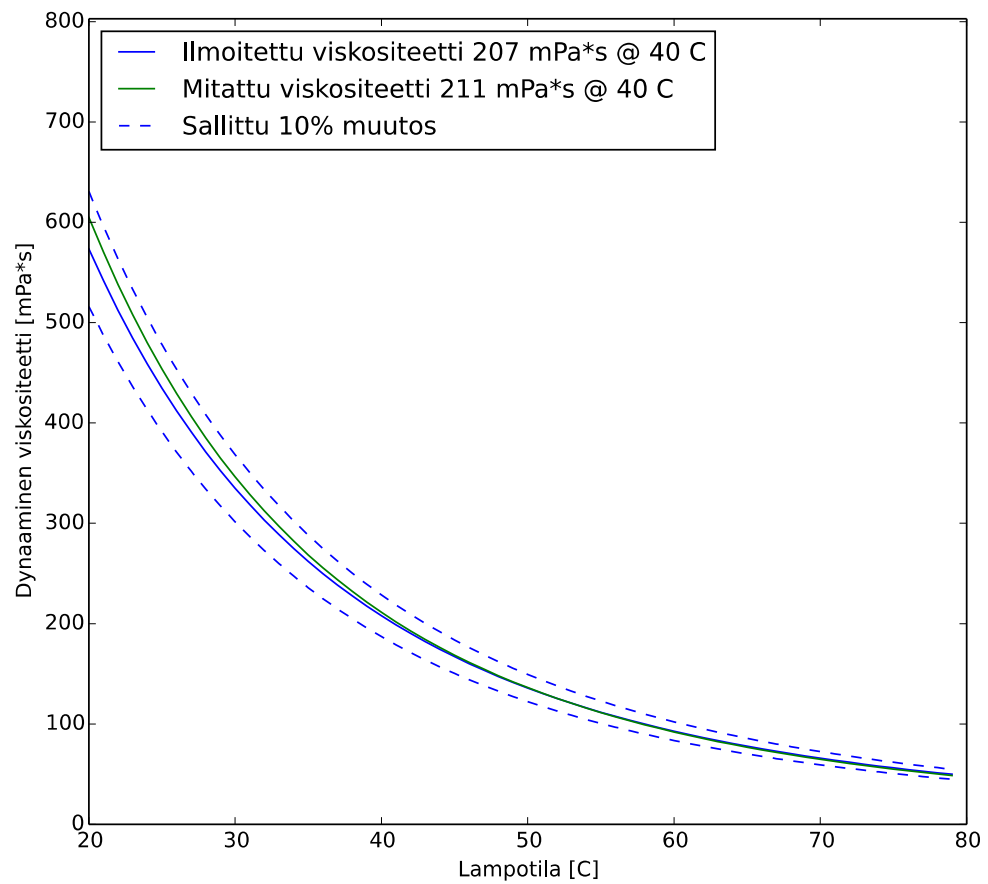
*Kuva E9. Position 120686 hammasvaihteen öljyn viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 320 EP.*



*Kuva E10. Position 12250302 hammasvaihteen öljyn viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 320 EP*



*Kuva E11 Position 14200102 hammasvaihteen öljyn viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 320 EP*

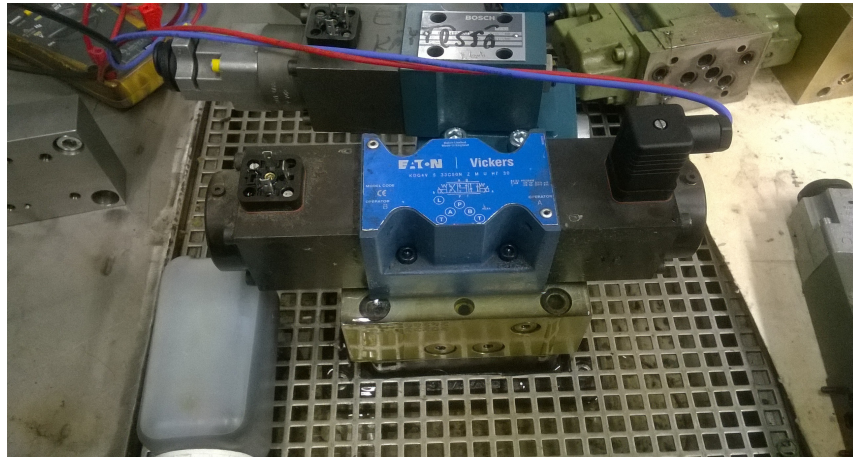


Kuva E12. Position 030507 tulpparuuvi hammasvaihteen öljyn viskositeetti verrattuna uuteen Neste vaihteisto 220 S

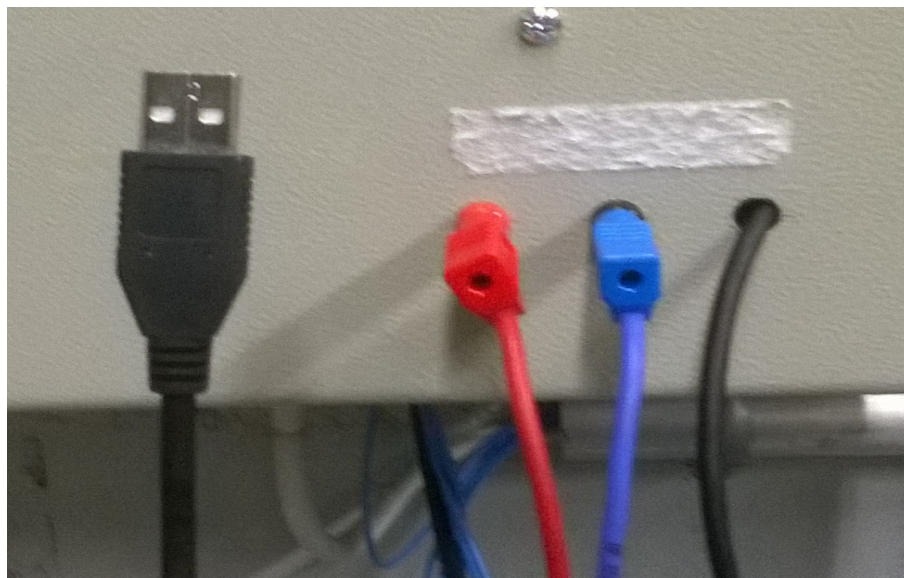


Kuva E13. Kuva E12. Position 030507 tulpparuuvi hammasvaihteen öljylasi ennen öljynvaihtoa. Pinta on selvästi laskenut ja öljy muuttunut sameaksi.

## LIITE F TESTAUSOHJE PROPORTIONAALIVENTTILEILLE



*Kuva F1. Kiinnitä testattava venttiili testauspenkkiin sopivan välilaatan ja kiinnityspulttien avulla. Kytke virtapistoke solenoidiin, jota haluat testata. Mittaa kelan resistanssi.*



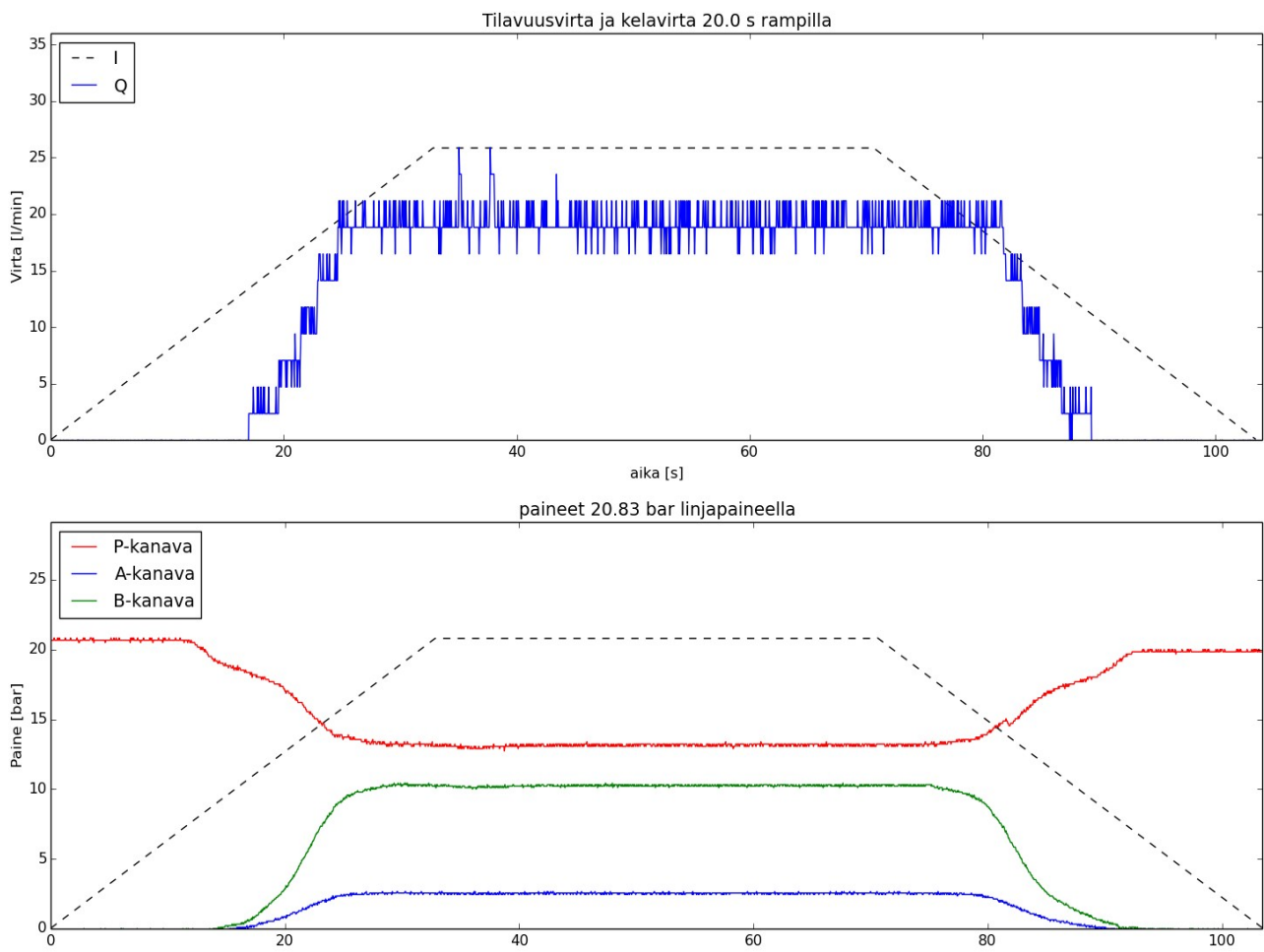
*Kuva F2. Kytken pistokkeen johdot sähkökeskukseen. Liitä USB tietokoneeseen. Kytke virta testauslaitteeseen kiertokytkimestä ja käynnistä hydraulikoneikko.*

Kohta 3. Suorita mittaustietokoneella Python scripti, käynnistyessään ohjelma pyytää syöttämään mitatun resistanssin ja kelan nimellisjännitteen, tämä siksi että kelaan ei syötetä ylivirtaa.

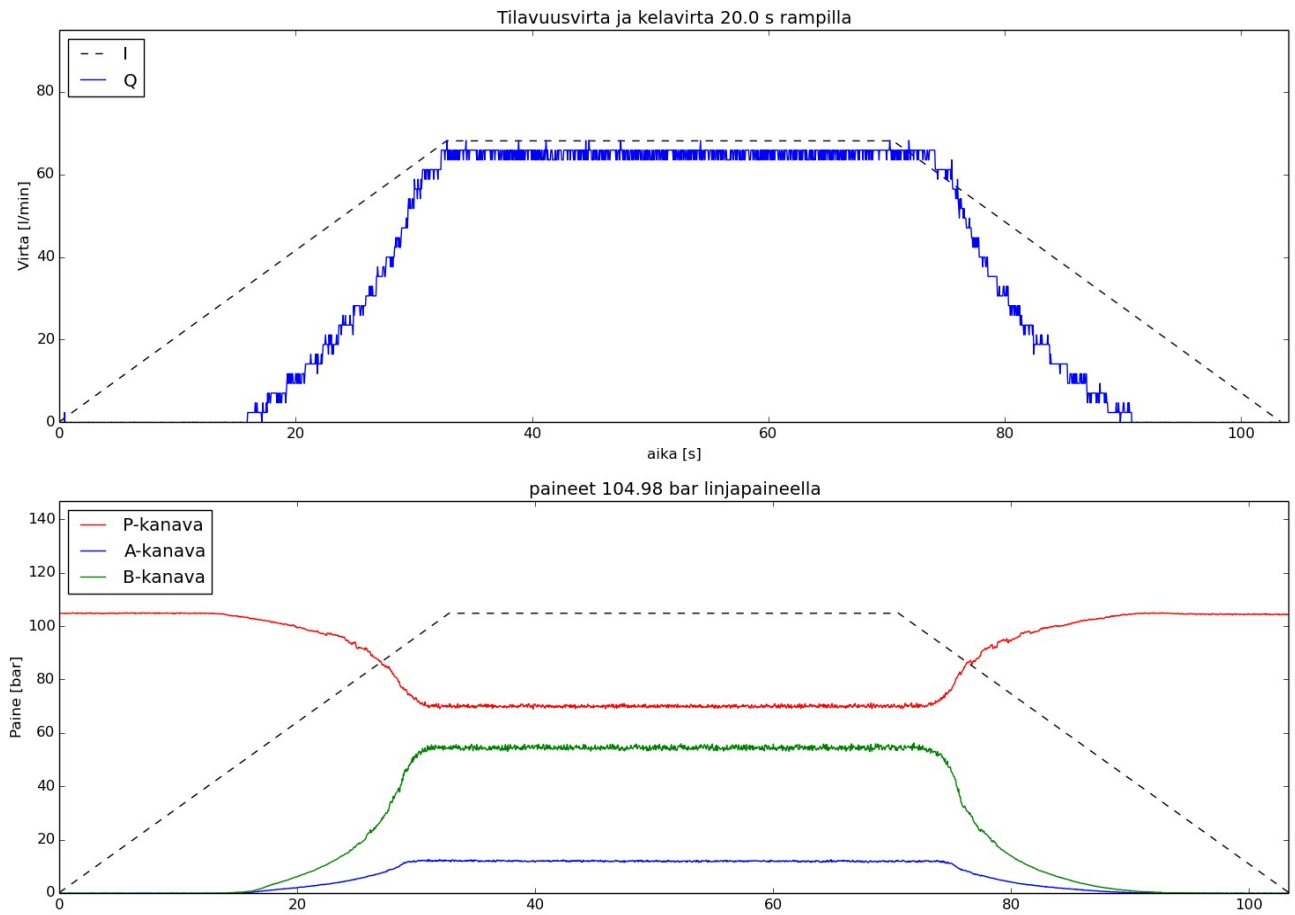


## LIITE G VENTTIILIN TESTAUSTULOKSIA

Painemittauksia liitteen F kuvan F1 venttiilille:



Kuva G1. Syöttöpaine 20 bar.



Kuva G2. Syöttöpaine 105 bar.

## LIITE H VENTTIILITESTAUSELEKTRONIIKAN DOKUMENTAATIO

Python scripti, joka syöttää solenoidiin virtaa halutulla rampilla ja pitää maksimivirran halutun ajan, jonka jälkeen virta laskee nolleen halutulla rampilla. Liitteessä 7 esitellyt kuvat tulostuvat mittauksen päätyttyä.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time
import u3
d=u3.U3()
d.configU3()
d.configIO(FIOAnalog=0)
d.getFeedback(u3.DAC0_8(0))
d.configTimerClock( TimerClockBase = 48, TimerClockDivisor = 1)#256
d.configIO( NumberOfTimersEnabled = 1 )
baseValue = 65536
d.getFeedback( u3.Timer0Config(TimerMode = 0, Value = baseValue) )
d.getFeedback( u3.Timer0( Value = baseValue-1, UpdateReset = True ) )
A_0=1.84803199999999981
B_0=1.84300799999999993
Q_0=1.84300799999999993
P_0=1.80281599999999982
MAX=0.02*470
ramp=float(3) #SAA MUUTTAA ramppiaka Sekuntia
pito=float(5) #SAA MUUTTAA täyden virran pitoaika sekuntia
R=float(7.7)   #Älä muuta muita arvoja
I_source=2.5
U=float(27)
R=float(input("Kelan resistanssi [Ohmia]"))
U_nom=float(input("Nimellisjännite [V]"))
tStep=0.03     #sekuntia
I_max=U/R
time0=time.time()
t=np.array([])
```

```

I=np.array([])
Q=np.array([])
p_A=np.array([])
p_P=np.array([])
p_B=np.array([])
I_sall=U_nom/R
if I_sall>I_source:
    I_sall=I_source*I_source/I_sall
for i in range(1,int(ramp/tStep)-2):

    setValue=int(i*(I_sall/I_max)*(baseValue/(ramp/tStep)))
    currentValue = (baseValue - (setValue))
    d.getFeedback( u3.Timer0( Value = currentValue, UpdateReset = True ) )
    t=np.append(t,time.time()-time0)
    I=np.append(I,float((float(setValue)/float(baseValue)*I_max)))
    Q=np.append(Q,d.getAIN(3))
    p_A=np.append(p_A,d.getAIN(1))
    p_P=np.append(p_P,d.getAIN(0))
    p_B=np.append(p_B,d.getAIN(2))
    time.sleep(tStep)

for i in range(1,int(pito/tStep)-2):
    t=np.append(t,time.time()-time0)
    I=np.append(I,float((float(setValue)/float(baseValue)*I_max)))
    Q=np.append(Q,d.getAIN(3))
    p_A=np.append(p_A,d.getAIN(1))
    p_P=np.append(p_P,d.getAIN(0))
    p_B=np.append(p_B,d.getAIN(2))
    time.sleep(tStep)

for i in np.arange(int(ramp/tStep)-2,1,-1):

    setValue=int(i*(I_sall/I_max)*(baseValue/(ramp/tStep)))
    currentValue = baseValue - setValue
    d.getFeedback( u3.Timer0( Value = currentValue, UpdateReset = True ) )
    t=np.append(t,time.time()-time0)
    I=np.append(I,float((float(setValue)/float(baseValue)*I_max)))
    Q=np.append(Q,d.getAIN(3))
    p_A=np.append(p_A,d.getAIN(1))
    p_P=np.append(p_P,d.getAIN(0))

```

```

p_B=np.append(p_B,d.getAIN(2))
time.sleep(tStep)

Q_l=(Q-Q_0)/0.00213519999999999816
p_A_bar=160*(p_A-A_0)/(MAX-A_0)
p_B_bar=160*(p_B-B_0)/(MAX-B_0)
p_P_bar=250*(p_P-P_0)/(MAX-P_0)

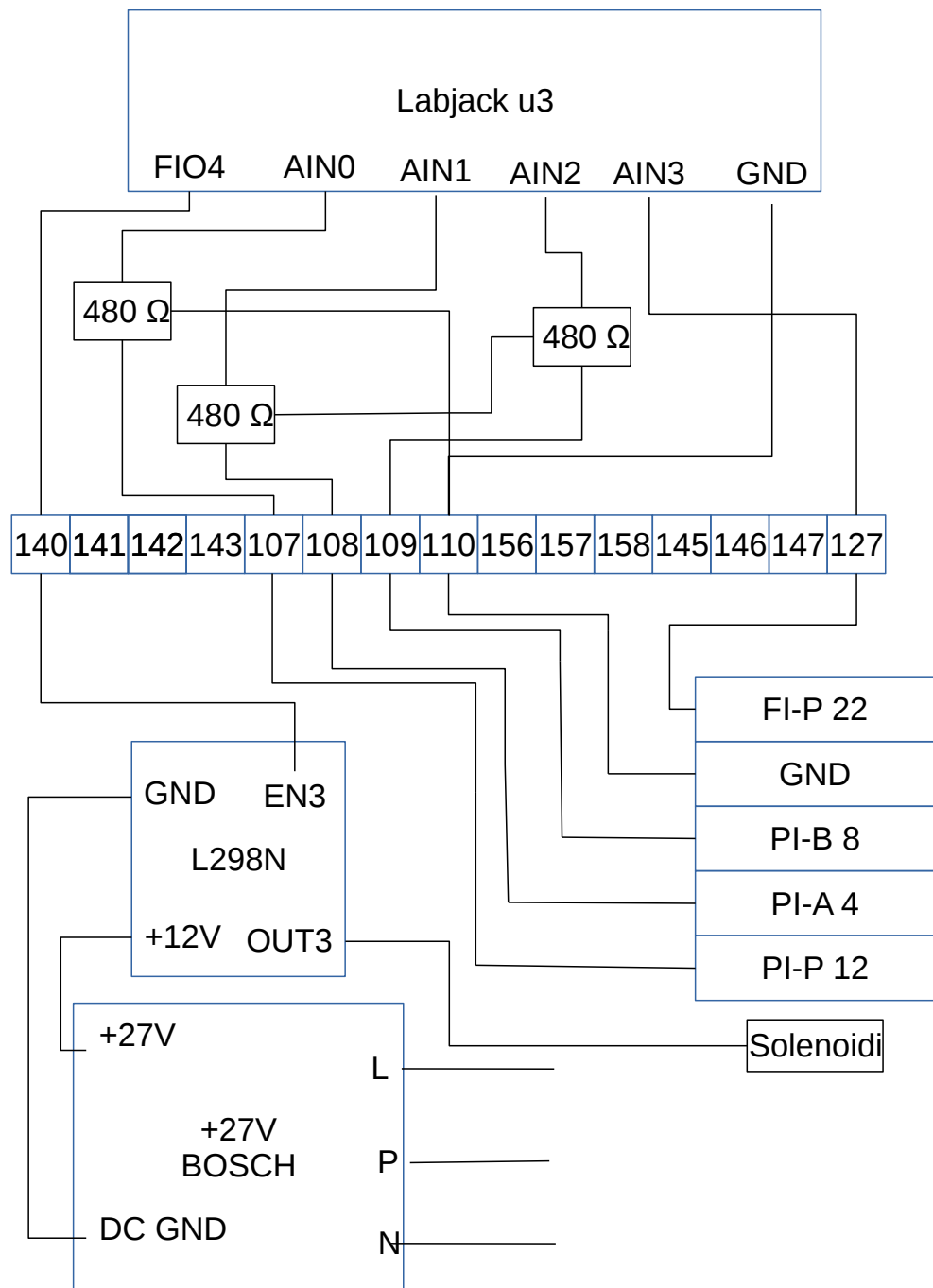
if p_A.max()<p_B.max():
    dP_bar=p_P_bar-p_B_bar
else:
    dP_bar=p_P_bar-p_A_bar

d.configIO( NumberOfTimersEnabled = 0 )
d.setFIOState( 4,0 )
d.close

fig1 = plt.figure(figsize=(18, 12))
plt.subplot(211)
plt.plot(t,Q_l.max()*I/I.max(), label='I',color='black',ls='--')
plt.plot(t,Q_l, label='Q',color='blue')
plt.ylabel('Virta [l/min]')
plt.xlabel('aika [s]')
plt.axis((0,int(t[-1])+1,0,int(1.4*Q_l.max())))
plt.legend(loc='upper left')
plt.title('Tilavuusvirta ja kelavirta ' + str(round(ramp,2)) + ' s rampilla')

plt.subplot(212)
plt.plot(t,p_P_bar,color='r',label='P-kanava')
plt.plot(t,p_A_bar,color='b',label='A-kanava')
plt.plot(t,p_B_bar,color='g',label='B-kanava')
plt.plot(t,p_P_bar.max()*I/I.max(),color='black',ls='--')
plt.ylabel('aika [s]')
plt.ylabel('Paine [bar]')
plt.axis((0,t.max(),0,1.4*p_P_bar.max()))
plt.legend(loc='upper left')
plt.title('paineet ' + str(round(p_P_bar.max(),2)) + ' bar linjapaineella')
plt.savefig('VenttiiliTulos.svg')
plt.show()

```



Kuva H1. Testausjärjestelyn sähkökytkennät